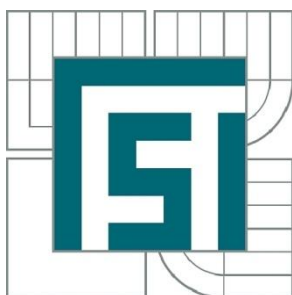


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

APLIKACE VR KAMERY NA PROBLÉMY MECHANIKY TEKUTIN

APPLICATION OF HS CAMERA TO PROBLEMS OF FLUID MECHANICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ADAM BOLCEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN JEDELSKÝ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Adam Bolcek

který/která studuje v **bakalářském studijní programu**
obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aplikace VR kamery na problémy mechaniky tekutin

v anglickém jazyce:

Application of HS camera to problems of fluid mechanics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysokorychlostní kamera (anglicky High Speed Camera - HSC) je užitečným nástrojem pro vizualizaci rychlých dějů v různých oblastech. V mechanice tekutin je HSC nepostradatelná zejména pro předběžné experimenty a posouzení charakteru daného jevu. Správné pořízení záznamu není triviální úlohou a vyžaduje systematický přístup. To bude předmětem práce.

Cíle bakalářské práce:

- Seznámení se s technikou pro HSC záznam, specifikace použitých komponent,
- příprava zařízení a optimalizace nastavení (objekt, kamera, osvětlení) pro zvolený problém mechaniky tekutin (vizualizace proudění),
- pořízení vlastního záznamu a jeho analýza,
- dokumentace experimentu.

Seznam odborné literatury:

PATA, V.: Vysokorychlostní kamerové systémy. 1. vydání Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2006. 92s. ISBN 80 - 7204 - 480 -X

Olympus i-SPEED 2, Instructions, High speed video camera system. Olympus i-SPEED 2, User guide, PC Software.

ŽURDINA, L. Metody vizualizace proudění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Lízal.

KOLOMAZNÍK, P. Metodika zkoumání rychlých a stochastických mechanických dějů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

PEŠEK, JAN., VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROVÝ SYSTÉM I-SPEED 2 A JEHO APLIKACE, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

SMITS, A. J. a LIM, T. T. Flow Visualization : Techniques and examples. London : Imperial College Press, 2003. ISBN 1-86094-193-1.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.10.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá metodami vizualizací kapalin a plynů a jejich zaznamenáním pomocí vysokorychlostní kamery.

V první části je stručně uvedeno rozdělení VR kamer podle principu činnosti. Dále pak popis kamery Olympus i-SPEED 2, která byla použita při realizaci experimentu. Základní parametry vysokorychlostních kamer a jejich vliv na záznam.

Druhá část popisuje různé metody vizualizací kapalin a plynů, a z toho plynoucí výhody a nevýhody použití dané metody.

Poslední část je věnována vytvoření vlastního záznamu vizualizace proudění plynu a jeho analýzou. Nalezení optimálního nastavení kamery a osvětlení scény záznamu.

ABSTRACT

The main subject of this bachelor thesis is visualization of liquids and gases and their recording with the help of a high-speed camera.

The first part deals with types of the high-speed cameras. Also, it is concerned with the description of the Olympus i-SPEED 2 camera which was used for the experiment. Finally, the thesis investigates fundamental parameters of the high-speed cameras and their influence on the recording.

The second part describes different methods of visualisation of liquids and gases and also consequent advantages and disadvantages of using each particular method.

The last part is dedicated to the creation of my own recording of the visualisation of flowing of gas and its analysis and also to the finding of an optimal setting of the camera and of the lighting of the scene of the recording.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokorychlostní kamera, snímkový kmitočet, čas závěrky, vizualizace proudění

KEYWORDS

High speed camera, frame rate, shutter, flow visualization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOLCEK, A. Aplikace VR kamery na problémy mechaniky tekutin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 33 s., 3 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Aplikace VR kamery na problémy mechaniky tekutin* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu zdrojů.

20. května 2013

.....

Adam Bolcek

.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Miloši Bělkovi za ochotu a pomoc při měření.

Při realizaci této bakalářské práce bylo využito přístrojové vybavení pořízené v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), reg. č.: CZ. 1.05/2.1.00/01.0002, id. kód: ED0002/01/01, financovaného z Operačního programu výzkum a vývoj pro inovace, který je spolufinancovaný ERDF (European Regional Development Fund).

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Vysokorychlostní kamery	2
2.1	Představení.....	2
2.2	Typy a vývoj VR kamer	2
2.2.1	Klasická kamera	2
2.2.2	Kamera s rotujícím hranolem.....	2
2.2.3	Kamera s rotujícím zrcadlem	3
3	Vysokorychlostní kamerové systémy Olympus	4
3.1	Popis kamery Olympus i-SPEED 2	5
3.1.1	Řízení kamery Olympus i-SPEED	7
3.1.2	Řízení pomocí CDU jednotky	7
3.1.3	Řízení pomocí dálkového ovládání RCP	9
3.1.4	Řízení pomocí softwaru Ethernet.....	10
4	Definice základních pojmů.....	11
4.1	Snímkový kmitočet - fmr.....	11
4.2	Objektiv	11
4.3	Elektronická závěrka -shutter	11
4.4	Hledáček	12
4.5	Snímač, FPN, kalibrace FPN.....	13
4.6	Osvětlení.....	13
5	Vliv různých funkcí na vlastní záznam.	14
5.1	Snímkový kmitočet-fmr.....	14
5.2	Objektiv	14
5.3	Čas závěrky-shutter	14
5.4	Polarizátor.....	14
5.5	Osvětlení	15
5.6	Změna kontrastu, jasu, barvy.....	15
6	Metody vizualizace	16
6.1	Metody vizualizace v kapalině	16
6.1.1	Klasické barvení.....	16
6.1.2	Mléko	18
6.1.3	Fluorescenční barva.....	18

6.1.4	Rheoscopic fluid.....	18
6.1.5	Electrolytic precipitation	19
6.1.6	Hydrogen Bubble Visualization	19
6.2	Metody vizualizace ve vzduchu.	20
6.2.1	Vizualizace pomocí kouřového tunelu	20
6.2.2	Vizualizace proudění pomocí héliových bublin	21
6.2.3	Vizualizace proudění pomocí nitřových sond	21
7	Vlastní experiment vizualizace	22
7.1	Měření trysky v různých režimech jejího provozu	22
7.1.1	Příprava měření	22
7.1.2	Vlastní měření	23
7.1.3	Analýza záznamu	23
7.2	Měření v krajních režimech provozu kamery	25
7.2.1	Snímkový kmitočet	25
7.2.2	Čas závěrky	27
8	Závěr.....	30
9	Seznam použité literatury	31
10	Seznam použitých zkratk a symbolů	32
11	Seznam příloh.....	33

1 Úvod

Proudění tekutin je složitý děj a pro jeho pochopení a popsání se často používá pořízení vizuálního záznamu ve formě fotografie či videa. Tato bakalářská práce se zabývá vizualizací proudění kapalin a plynů a jejich zaznamenáním pomocí vysokorychlostní kamery. Téma jsem zvolil, protože nabízí zajímavé porovnání teoretických znalostí a předpokladů s praktickou zkušeností vycházející z reálného experimentu.

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření vlastního záznamu vizualizace proudění a jeho analýza. Předmětem experimentu se stal dvoumédiový atomizér vytvářející olejový sprej. Analýza spočívala v popsání proudění tohoto spreje, určení jeho rychlostí, a dále pak v nalezení a vyhodnocení vhodných podmínek pro vytvoření záznamu z hlediska možností nastavení kamery a osvětlení.

2 Vysokorychlostní kamery

2.1 Představení

Vysokorychlostní kamery slouží k vytvoření záznamů velmi rychlých dějů, které mohou být následně přehrávány zpomaleně. Záznam je ukládán přímo do vnitřní paměti kamery, odkud je poté převeden do počítače, kde může být dále zpracován. Zpracování spočívá v možnosti přehrávání a analýzy po jednotlivých snímcích, grafických úpravách, nebo i určování rychlostí a rozměrových charakteristik. Počty snímku zaznamenaných za sekundu se u těchto zařízení pohybují od 60 do desítek milionů. Nevýhoda velkého počtu za sekundu je, že při nich dochází ke snižování rozlišení záznamu a snížení světlosti.

2.2 Typy a vývoj VR kamer

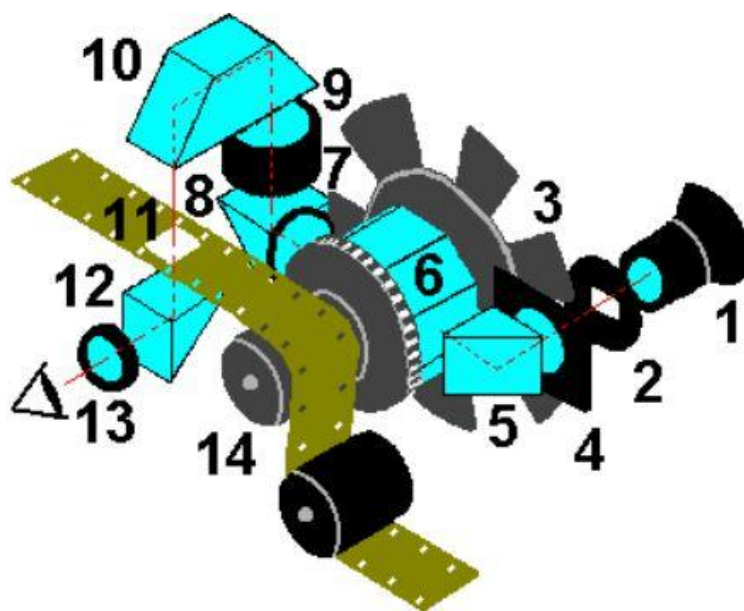
Typy vysokorychlostních kamer se dají rozdělit do tří skupin podle principu činnosti. [14]

2.2.1 Klasická kamera

První skupinou jsou klasické kamery vytvářející záznam na filmovou pásku. Páska se posunuje pravidelně o vzdálenost jednoho promítacího políčka a na dobu expozice je zastavena. Klasické kamery takto vytváří 25 snímků za sekundu. Pro vysokorychlostní kamery je potřeba upravený mechanismus, který zajistí vyšší frekvenci posouvání pásky a zároveň ji nepoškodí. Tyto kamery se používaly v minulosti a jejich snímková frekvence se pohybuje kolem stovek snímků za sekundu. Dnes se místo pohyblivého filmu používá pevně umístěný CCD nebo CMOS čip, ale princip činnosti je stejný.[14]

2.2.2 Kamera s rotujícím hranolem

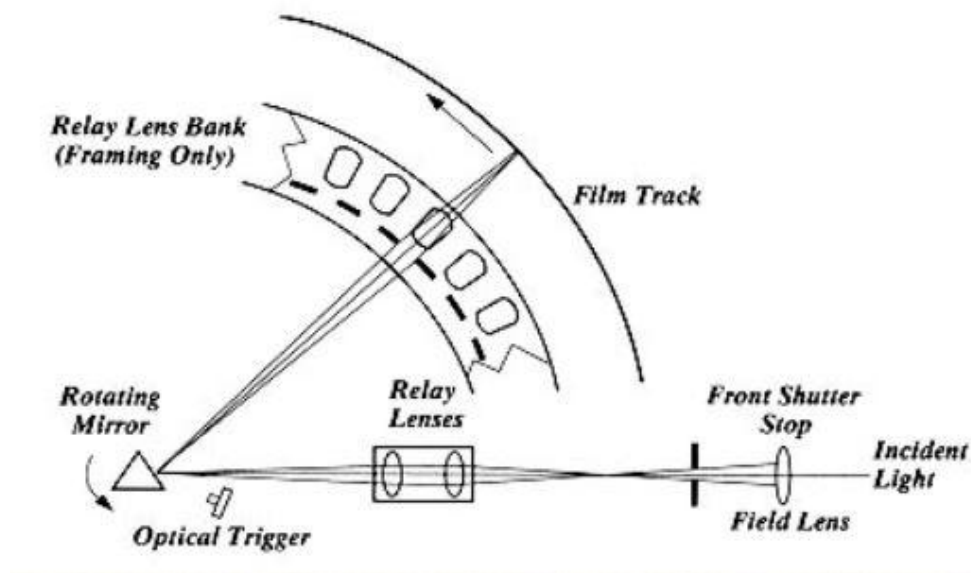
Další skupinou jsou kamery s rotačním hranolem, které už jsou speciálně vyvinuty pro vysokorychlostní snímání. Jejich princip je zobrazen na Obr. 2-1. Dříve se používaly s filmovým páskem a dnes je použit CCD nebo CMOS čip. Dosahují snímkového kmitočtu v řádech tisíců snímků za sekundu. [14]



Obr. 2-1 [15]

2.2.3 Kamera s rotujícím zrcadlem

Kamera s rotačním zrcadlem je v současnosti nejrychlejší záznamové zařízení tohoto druhu. Dokáže vytvořit snímkovou frekvenci v řádech desítek miliónů snímků za sekundu. Dříve se používal filmový pásek a bylo možno zachytit jen velmi krátký záznam. Dnes se používá CCD nebo CMOS čip a doba záznamu se prodloužila. Princip činnosti této kamery je na Obr. 2-2. [14]



Obr. 2-2 [16]

3 Vysokorychlostní kamerové systémy Olympus

Společnost Olympus má v nabídce šest základních typů vysokorychlostních kamer. Každý typ má speciální určení. Jednotlivé typy jsou zde stručně charakterizovány a v Tab. 3-1 je přehled jejich parametrů.[17]

i-SPEED 2 Určena pro výzkum a vývoj s maximálním počtem snímku 33 000 za sekundu, umožňuje okamžité přehrání a analýzu záznamu v CDU.

i-SPEED 3 Vyvinuta pro řešení pokročilých aplikací, kde poskytuje vysoké rozlišení, má nízkou světelnou citlivost a vhodné užití při analýze nástrojů ve vývoji.

i-SPEED LT Navržena pro aplikace kde je hlavní požadavek jednoduché a snadné zaměření a nasnímaní objektů, při zachování přenosnosti a odolné konstrukce. Vhodná například při analýze působení průmyslu na životní prostředí.

i-SPEED FS Vyvinuta především pro užití v balistice, ale může mít i jiná využití. Maximálním počtem snímku 1 000 000 za sekundu a čas závěrky 0,2 mikrosekund vyhovují právě účelům balistiky.

i-SPEED TR Vyvinuta pro výzkum a vývoj v průmyslových společnostech, kde je primární cíl získat kvalitní záznam a jeho následnou analýzu na výpočetní technice. Maximálním počtem snímku 10 000 za sekundu je vhodný pro většinu prováděných testů.

i-SPEED PL Určena pro umělecký průmysl, na výrobu dokumentů, reklam a hudebních videí. Kamera je snadno ovladatelná, dobře přenosná a vytváří výjimečně kvalitní záznam.

MODEL	SENSOR TYPE	SENSOR RESOLUTION	FULL SENSOR RESOLUTION TO	MAXIMUM FRAME SPEED	GLOBAL SHUTTER
i-SPEED 2	CMOS	800 x 600	1000 fps	33 000 fps	5 μ s
i-SPEED 3	CMOS	1280 x 1024	2000 fps	150 000 fps	2.16 μ s (HQ mode) / 1 μ s (QS mode)
i-SPEED FS	CMOS	1280 x 1024	2000 fps	1 000 000 fps	0.2 μ s
i-SPEED LT	CMOS	800 x 600	1000 fps	2000 fps	5 μ s
i-SPEED TR	CMOS	1280 x 1024	2000 fps	10 000 fps	2.16 μ s
i-SPEED PL	CMOS	1280 x 1024	2000 fps	5000 fps	1.4 μ s

Tab. 3-1 [17]

3.1 Popis kamery Olympus i-SPEED 2

Následující část je věnována širšímu popisu kamery Olympus i-SPEED 2 viz Obr. 3-1.



Obr. 3-1 [13]

Vysokorychlostní kamera má kompaktní rozměry: šířka/výška/délka 115/110/233 mm a hmotnost 2 kg.

Používá obrazový snímač CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor, který je používán u většiny vysokorychlostních kamer. Jeho výhodou je nižší cena oproti snímači CCD, menší spotřeba energie a umožní vyrábět menší kamery. Nevýhodou je horší citlivost na světlo. Kamera je vyráběná jako černobílá nebo barevná verze, schopna zachytit 60 až 33 000 snímků za sekundu. Maximální rozlišení je 800 x 600 bodů, které poskytuje do 1000 snímků za sekundu. Při zvýšení počtu snímků za sekundu rozlišení klesá, proto je vždy nutné vhodně nastavit fmr, abychom ze záznamu získali potřebné informace.

Dále kamera nabízí funkci tzv. shutter, což znamená závěrka, kterou je možno získat ostřejší záznam tím, že se zkrátí čas expozice (vhodné pro rychlé děje, kde předem známe trajektorii pohybu).

Kamera má vnitřní kruhovou paměť tzn., že po jejím zaplnění nejnovější snímek přemaže ten nejstarší. Její standardní velikost je 2 GB. Po vypnutí se záznam v paměti neukládá, proto je nutné ho ještě před odpojením ze sítě stáhnout a uložit. Doba záznamu je závislá na fmr, do paměti se při plném rozlišení vejde určitý počet snímků, maximální počet snímků za sekundu při plném rozlišení je 1000, když se zmenší fmr na hodnotu menší než 1000, doba záznamu se prodlouží, protože snímky jsou ukládány v delších časových úsecích. Pokud se zvýší rychlost

záznamu na více jak 1000 fmr, automaticky se sníží počet bodů tvořící jeden obrázek funkcí tzv. „výřez“, ale doba záznamu je nadále přibližně stejná, protože i když jsou snímky ukládány častěji mají menší velikost. Kamera nabízí také několik úsporných režimů. Širokoúhlý režim odřeže horní a dolní kraj obrazu, výškový režim odřeže pravý a levý okraj. Čtvercový režim odřízne pravý, levý, horní i dolní okraj obrazu. Čtvercový režim využívá ke snížení snímané plochy zoom zabudovaný do elektroniky kamery. Parametry kamery jsou zobrazeny v Tab. 3-2.

Příslušenství kamery je několik objektivů s různou ohniskovou vzdáleností, které je možné snadno vyměnit a zvyšují tak univerzálnost použití kamery.[1]

Možnosti mechanického upevnění

Závit pro stativ:

Standartní závit pro stativ 1/4" Whitworth

Upevnění objektivu:

Držák standart C-mount

Možnost upevnění lehkého příslušenství:

Na spodní straně kamery 4 x 1/4" Whitworth

Elektrická připojení:

Vstupní napětí :

12 DCV \pm 10 %

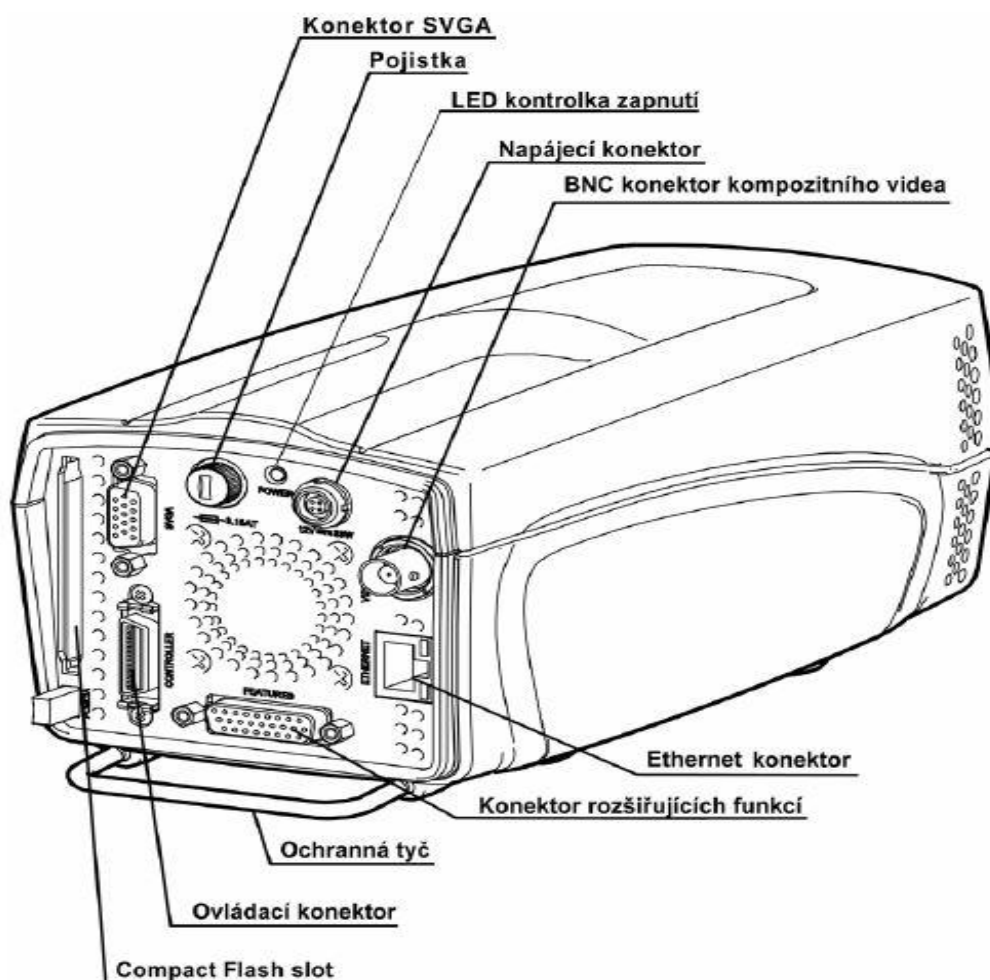
Kamera:

28 W max

Systém:

26 W max

Konektorové osazení kamery:



Rozlišení		Počet pixelů na snímek	Poměr zvětšení	Počet snímků za sekundu	Maximální počet snímků v paměti *	Doba záznamu [s]*
H	V					
800	600	480000	1,00	60	4473	74,55
800	600	480000	1,00	100	4473	44,73
800	600	480000	1,00	150	4473	29,82
800	600	480000	1,00	200	4473	22,37
800	600	480000	1,00	300	4473	14,91
800	600	480000	1,00	400	4473	11,18
800	600	480000	1,00	500	4473	8,95
800	600	480000	1,00	600	4473	7,46
800	600	480000	1,00	800	4473	5,59
800	600	480000	1,00	1000	4473	4,47
672	504	338688	1,19	1500	6340	4,23
576	432	248832	1,39	2000	8630	4,32
448	336	150528	1,79	3000	14266	4,76
384	288	110592	2,08	4000	19418	4,85
320	240	76800	2,50	5000	27962	5,59
288	216	62208	2,78	6000	34521	5,75
256	192	49152	3,13	8000	43690	5,46
224	168	37632	3,57	10000	57065	5,71
160	120	19200	5,00	15000	111848	7,46
128	96	12288	6,25	20000	174762	8,74
96	72	6912	8,33	30000	310689	10,35
96	72	6912	8,33	33000	310689	9,41

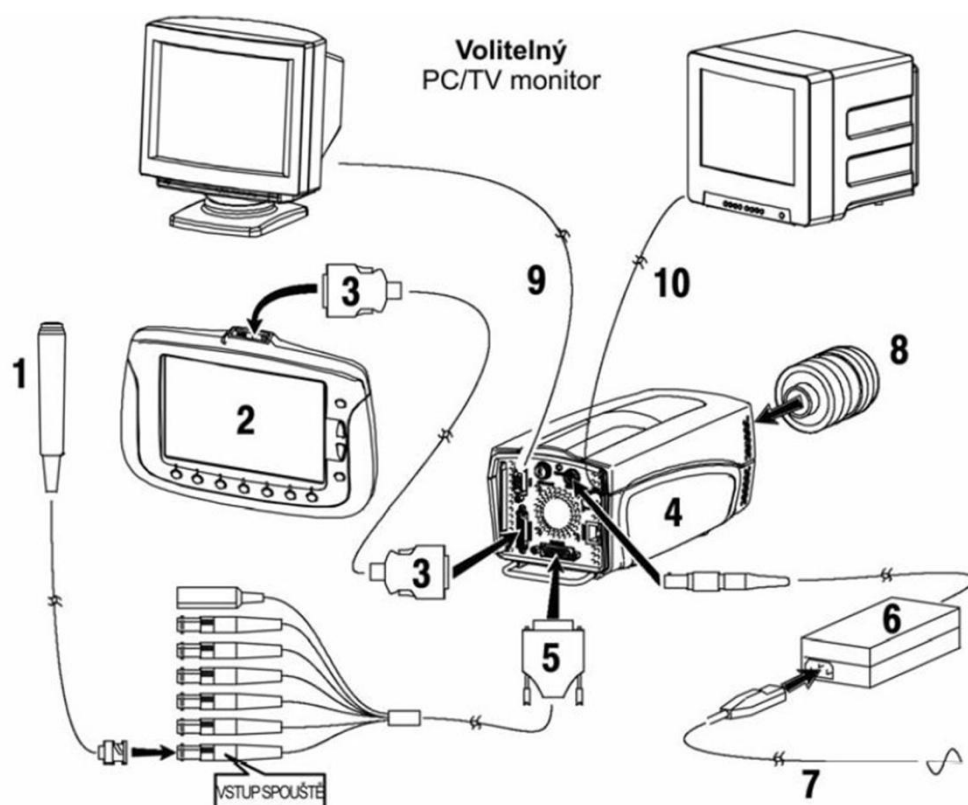
Tab. 3-2 [1] Standardní kapacita vnitřní paměti kamery je 2 GB

3.1.1 Řízení kamery Olympus i-SPEED

Řízení kamery může být realizováno třemi způsoby. Tyto jsou následně stručně popsány i se schémata zobrazující jejich základní zapojení.[1]

3.1.2 Řízení pomocí CDU jednotky

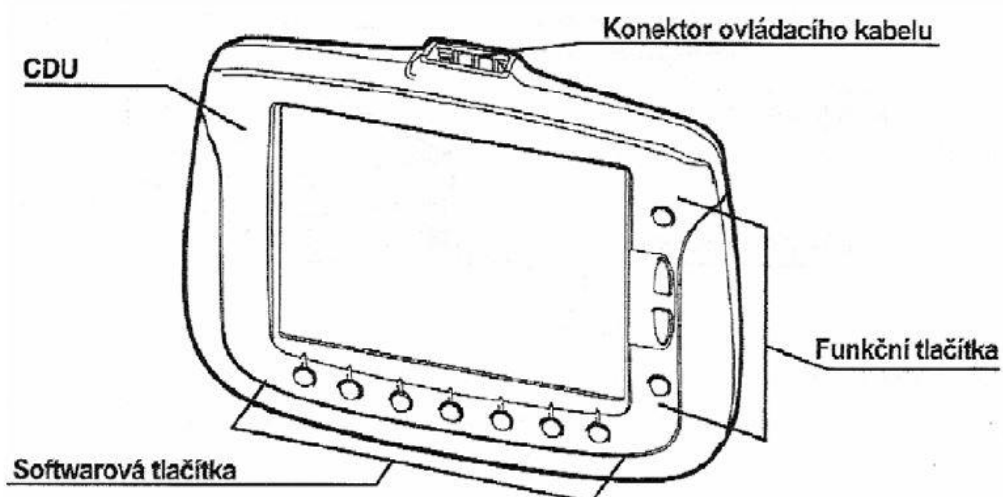
CDU (Controller Display Unit) univerzální jednotka pro řízení kamery. Její výhoda je, že ukazuje aktuální nastavení a živý záznam. Je napájena z kamery. Je možno ji umístit na podložku, stativ nebo i ruku uživatele (pomocí řemínku na zadní straně CDU). Nevýhoda je, že není standartně dodávána s kamerou a musí se dokoupit. Na Obr. 3-3 je schéma zapojení CDU jednotky. Na Obr. 3-4 je detail CDU.[1]



Legenda

- | | |
|--|---|
| 1 Spínač spouště | 6 Napájecí zdroj (PSU) |
| 2 CDU (Ovladač displeje) | 7 Síťový napájecí kabel |
| 3 Ovládací kabel | 8 Objektiv s držákem C-mount |
| 4 Kamera | 9 VGA kabel |
| 5 Kabel konektoru rozšiřujících funkcí | 10 Kabel kompozitního videa s BNC konektory |

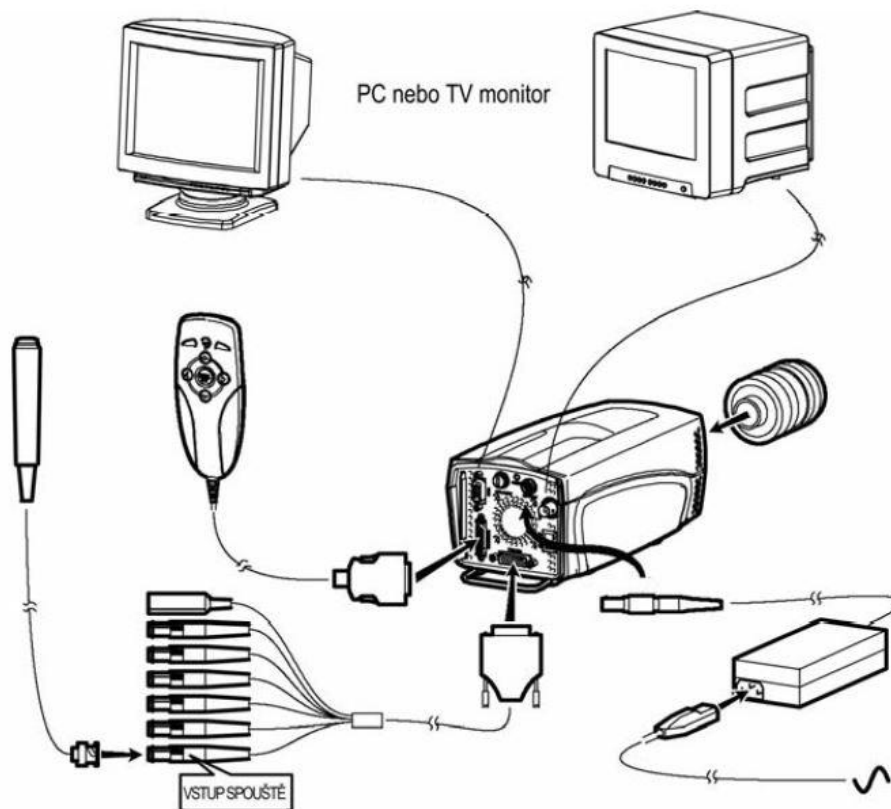
Obr. 3-3 [1]



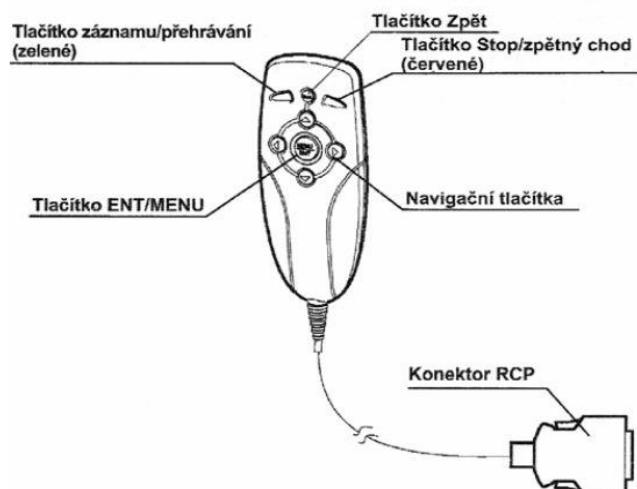
Obr. 3-4 [1]

3.1.3 Řízení pomocí dálkového ovládání RCP

Ruční přístroj, který se připojí k ovládacímu konektoru kamery. Kamera rozpozná připojenou jednotku RCP a zobrazí na PC nebo TV monitoru speciální menu. Jednotka slouží k pohybu v tomto menu. RCP je napájeno z kamery. Schéma zapojení je na Obr. 3-5a detail jednotky na Obr. 3-6 .



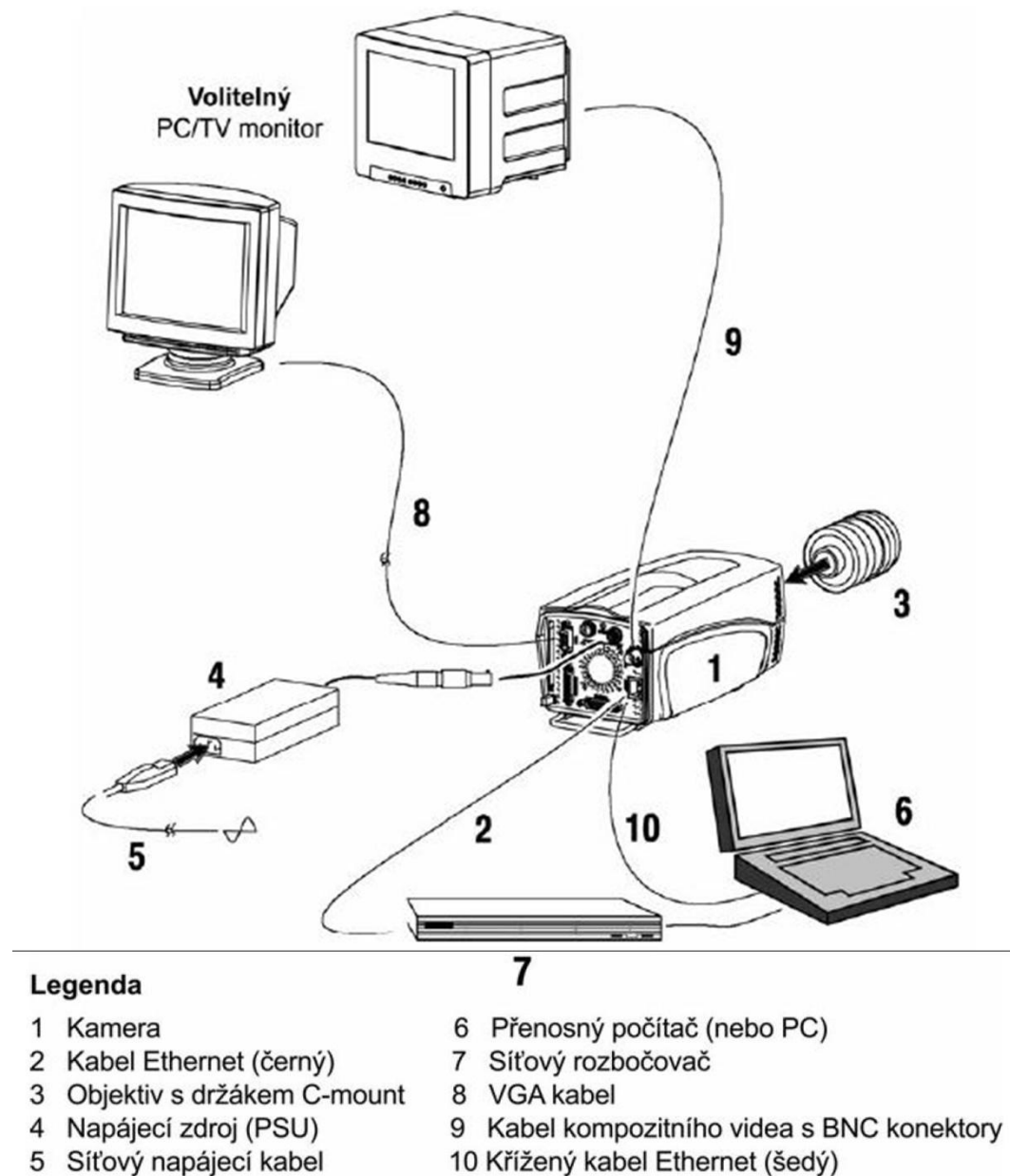
Obr. 3-5 [1]



Obr. 3-6 [1]

3.1.4 Řízení pomocí softwaru Ethernet

Software nainstalovaný v počítači a propojený s kamerou datovým kabelem umožní řídit kameru a následně ukládat a pracovat se záznamem. Výhoda je, že uživatel může přes počítač ovládat více kamer (až 255, každá má své neměnné IP číslo) a zároveň nemusí být v jejich bezprostřední blízkosti (ochrana uživatele například při crash testech, testech výbušnin a podobně). Základní verze softwaru je součástí kamery. Pokud bychom měli zájem o pokročilý software, musel by se dokoupit zvlášť. Na Obr. 3-7 je základní schéma zapojení.[1]



Obr. 3-7 [1]

4 Definice základních pojmů

Následně jsou stručně vysvětleny prvky používané při záznamu, které by uživatel kamery měl bezpečně znát.

4.1 Snímkový kmitočet - fmr

Počet snímků zaznamenaných za sekundu. Je to jeden z nejdůležitějších parametrů nastavovaných při práci s kamerou. Standartní kamery mají fmr 25, vysokorychlostní až několik stovek tisíc. Se zvyšujícím fmr však dochází ke zkrácení doby, kdy dopadá světlo na čip a tím ke ztmavnutí obrazu. Tento jev je nežádoucí a proto se musí fmr vhodně zvolit, aby byl zachycen požadovaný děj a zároveň nezpůsobil záznam příliš tmavý.

4.2 Objektiv

Výběr objektivu významně ovlivní kvalitu získaného záznamu. Musí se zvolit vhodná ohnisková vzdálenost pro danou scénu a clonové číslo.

Dlouhá ohnisková vzdálenost se používá tam, kde je kamera umístěna daleko od scény. Vyplyývá z toho větší zvětšení. Nevýhoda je zmenšení zdánlivé vzdálenosti objektů na scéně ve směru pohledu tzv. komprese perspektivy. Objektivy s dlouhou ohniskovou vzdáleností mají obvykle nižší světlost, což není při vysokorychlostním snímání příliš vhodné (opět přicházíme o světlo).

Objektiv s krátkou ohniskovou vzdáleností se používá tam, kde je kamera umístěna blízko scény. Pokud je ohnisková vzdálenost velmi krátká, nastává deformace perspektivy tzv. soudkové zkreslení.

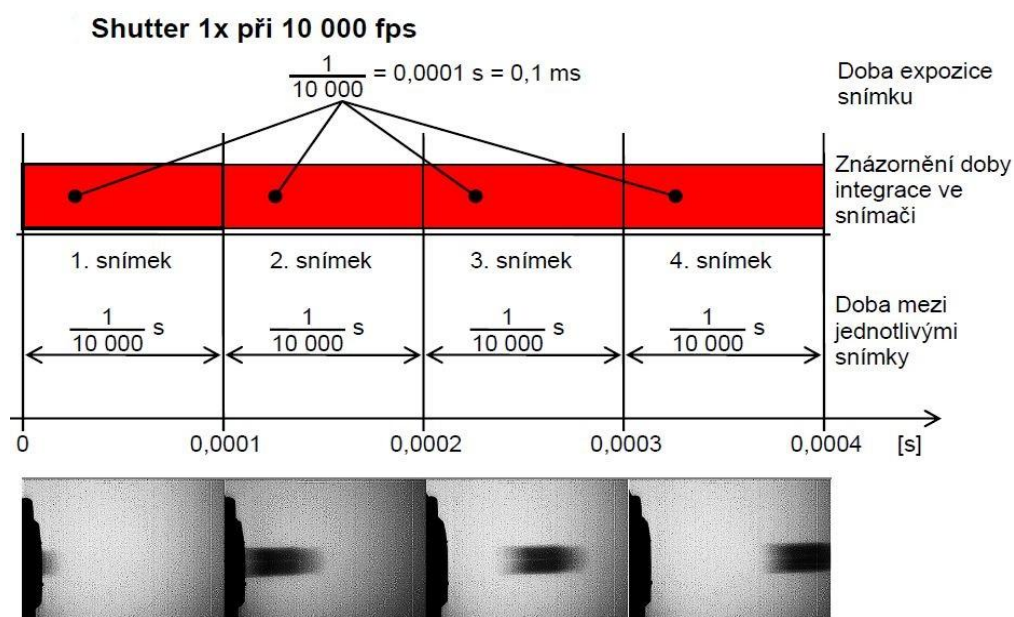
Další parametr objektivu je světlost. Její hodnoty jsou udány bezrozměrným clonovým číslem (k). Toto vyjadřuje poměr ohniskové vzdálenosti ku průměru vstupní pupily. Pro objektiv je vždy uvedena nejvyšší možná hodnota. Se zápisem f/k , $1:k$.

Clona řídí množství světla vstupujícího do kamery. Se zvýšením clonového čísla klesá množství světla, které clonou prochází. Zvýšení clonového čísla na 1,4 násobek (např. z hodnoty $f/4$ na hodnotu $f/5,6$) odpovídá změně o 1 clonové číslo a sníží množství procházejícího světla na polovinu. Zvýšení clonového čísla zvýší hloubku ostroty (schopnost současně zaznamenat ostře blízké i vzdálenější objekty). Tato výhoda je ale v rozporu s požadavkem vysokorychlostního záznamu, kdy je potřeba získat pro záznam co nejvíce světla. Proto je nutné zvolit správné nastavení, aby všechny požadované objekty záznamu byly ostré a zároveň dostatečně jasné.

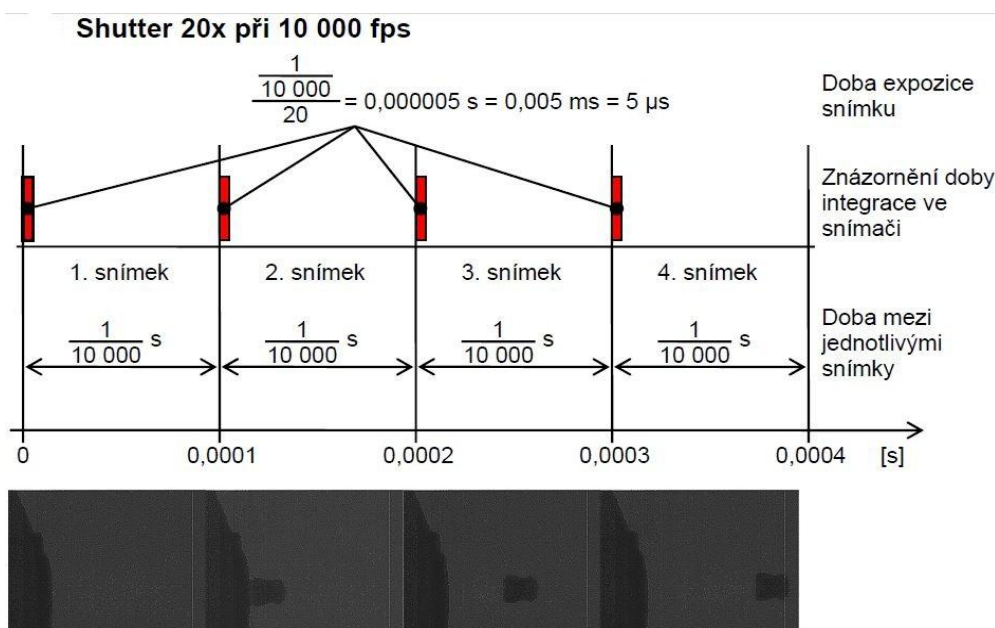
Obecně se doporučuje volit vyšší clonové číslo (menší otvor v objektivu) pro zvýšení hloubky ostroty a zkvalitnit osvětlení scény.[1]

4.3 Elektronická závěrka -shutter

Elektronická závěrka, která pomáhá snížit pohybovou neostrost objektu. Pokud se snímáný objekt pohybuje velmi rychle, může se za dobu expozice posunout natolik, že se jeví jako rozmazaný. Tuto pohybovou neostrost je možno eliminovat zkrácením expozičního času, který se udává jako poměr převrácené hodnoty snímkového kmitočtu a hodnoty závěrky. Například závěrka 20x způsobí její otevření pouze po $1/20$ možné doby snímání. Snižování času závěrky je využitelné až od chvíle, kdy při zvyšování počtu snímků za sekundu začne klesat rozlišení. U kamery olympus i-SPEED 2 je to od 1000 fmr. Dále je tímto ztracena (vynechána) část obrazové informace a to je nutno uvažovat v konkrétním experimentu. Zkrácení času závěrky také klesne množství světla dopadajícího na snímač a proto je i zde potřeba zvýšit osvětlení. [1] Na Obr. 4-1 je vidět použití závěrky 1x při záznamu střely diablo při 10 000 snímcích za sekundu. Záznam má dobrý kontrast, ale objekt je rozmazaný. Na Obr. 4-2 je vidět (při použití stejného snímkového kmitočtu) použití závěrky 20x. Záznam ztmavnul, ale střela je nyní vidět ostře.



Obr. 4-1 [13]



Obr. 4-2 [13]

4.4 Hledáček

Kamera zobrazuje živý záznam aktualizovaný 60krát za sekundu na připojeném monitoru nebo jednotce CDU kdykoli, kdy je to možné z hlediska funkce. Tímto je umožněno správné nasměrování kamery na snímáný objekt. Například při přehrávání záznamu nebo jeho analýze toto umožněné není.[1]

4.5 Snímač, FPN, kalibrace FPN

Kamera používá obrazový snímač typu CMOS. Všechny snímače CMOS vnáší do obrazu pevný obrazec rušení (FPN). Většina vysokorychlostních kamer je vybavena funkcemi na korekci FPN a kamera Olympus i-SPEED 2 je vybavena plně automatickým kalibračním systémem. Po zapnutí kamery je systém automaticky aktivován. Tato automatická aktivace je ve většině případů dostačující, pouze při použití kamery za vysokých teplot je nutné systém aktivovat ručně ovládacím prvkem v menu po jistém čase od zapnutí. FPN způsobuje zrnitý vzhled a tenké svislé čáry v obrazu.[1]

4.6 Osvětlení

Osvětlení má velký vliv na kvalitu získaného záznamu. Většina záběrů při vysokorychlostním snímání vyžaduje silné osvětlení. Obecně se volí osvětlení o příkonu 500 až 2000 kW. Při použití několika bodových reflektorů. Při menší ploše záběru se použijí průmyslová svítidla a světlovody. V mnoha případech není efektivní použít pouze svítidla o vysokém příkonu, ale důležitější je světlo správně soustředit.[1]

5 Vliv různých funkcí na vlastní záznam.

Pro seznámení se se základními vlastnostmi a možnostmi nastavení kamery byl proveden malý experiment. K jednoduchému praktickému odzkoušení parametrů bylo zvoleno pořízení záznamu proudění plynu ve skleněné trubici a z této trubice. Jak je ukázáno na Obr. 5-1. Jako zdroj plynu byla použita vonná tyčinka. Proudění je pomalé s rychlostí několika $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměr trubice je 10 mm.

5.1 Snímkový kmitočet-fmr

Při snímání kouře vonné tyčinky procházejícího skleněnou trubicí byl postupně zvyšován fmr až na hodnotu 800. Pro vyšší hodnotu už se nedaří objekt efektivně nasvítit (je vidět jen malá část děje, která nic neříká o celkovém průběhu). Při 800 fmr je možno záznam velice zpomalit a pozorovat v detailu. Po uložení je možné pomocí změny kontrastu, jasu a barev efektivně zviditelnit strukturu proudění. Pokud použijeme nižší fmr (500, 400, 200) je objekt světlejší a není tak náročné ho nasvítit. Protože je rychlost proudění malá, na analýzu stačí i takovýto nižší fmr. Pro vyšší rychlosti by se musel použít vyšší fmr a zajistit dobré nasvětlení.



Obr. 5-1

5.2 Objektiv

Pro snímání proudění plynu v trubici malého průměru (10 mm) a použití objektivu s nejmenší ohniskovou vzdáleností (25 mm) je clona plně otevřená, protože hloubka ostrosti je tomto případě dostatečná (cca 4 cm). Zvyšování clonového čísla se v tomto případě ukazuje jako zbytečné, pouze sníží množství světla. Pokud by trubice byla většího průměru a nedařilo se současně zaostřit plyn u bližší i vzdálenější stěny, bylo by potřeba clonové číslo zvýšit a zároveň zvýšit osvětlení scény.

5.3 Čas závěrky-shutter

Proudění v trubici je relativně pomalé. A už při použití závěrky 1x se daří pořídit kvalitní (ostřý) záznam, při zvyšování doby závěrky na 2x a vyšší nenastává změna v kvalitě k lepší hodnotě, pouze se sníží množství světla a záznam je tmavší. Pokud by proudění bylo rychlejší, dalo by se snížením času závěrky využít ke zvýšení ostrosti záznamu, ale pro dané podmínky, především nižší rychlost proudění, je nejvhodnější zvolit shutter 1x.

5.4 Polarizátor

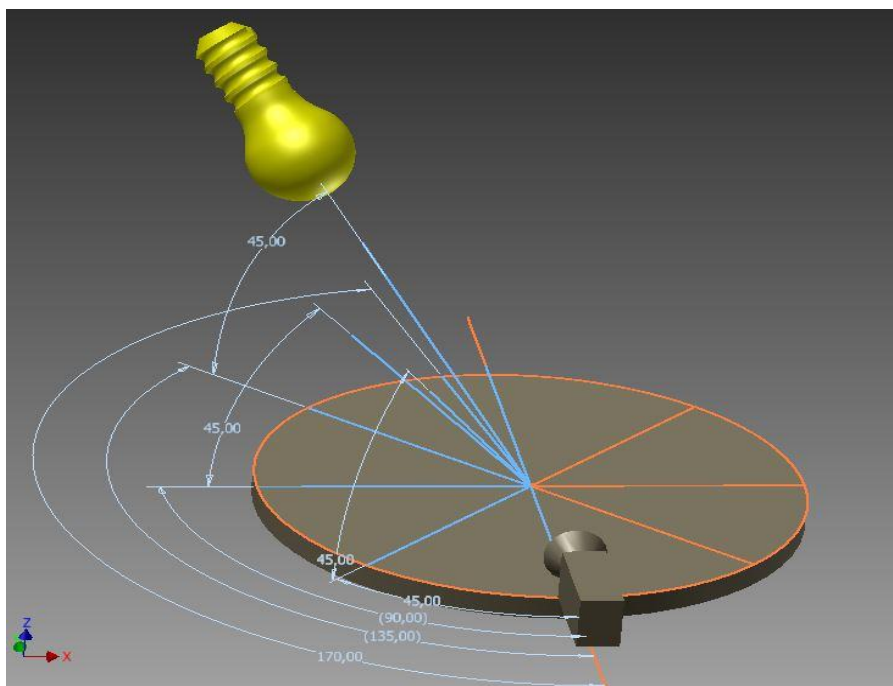
Velice vhodný nástroj pro snímání proudění v trubici je polarizátor viz Obr. 5-2. Světlo, kterým je scéna nasvícena se odráží od skleněné trubice, může způsobit její přesvícení a zcela znehodnotit záznam nebo i poškodit snímací čip kamery. Polarizátor se nasadí na objektiv a vhodným pootočením způsobí vyrušení světla. Při použití na snímání proudění jedné trubice je to efektivní a jednoduchý nástroj. Pro případné snímání více trubic najednou by bylo použití složitější.



Obr. 5-2 [4]

5.5 Osvětlení

Pro osvětlení scény bylo použito LED diodové světlo. Bylo zkoušeno nasvícení z různých úhlů. Zdroj světla byl přesouván v horizontální rovině od 10° do 180° a bylo hledáno optimální nasvícení. Dále byl zdroj světla zvednut a natočen do vertikálního úhlu 45° a znova posouván od 10° do 180° v rovině horizontální. Nejefektivnější nasvícení bylo nalezeno právě pod vertikálním úhlem 45° a horizontálním úhlem 135° , jak je také ukázáno na Obr. 5-3.



Obr. 5-3

5.6 Změna kontrastu, jasu, barvy

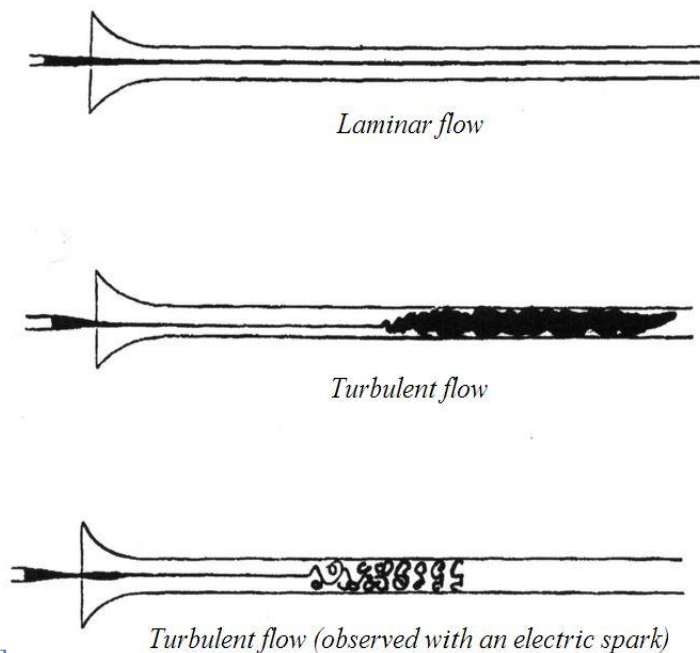
Po pořízení a uložení záznamu byla pro zviditelnění struktury proudění použita změna kontrastu, jasu a barvy. Jako první se zvýšil kontrast a následně jas. Pro nejlepší nastavení bylo potřeba experimentovat se změnami obou hodnot, aby se získal nejlepší obraz. Jako poslední se změnila barva a její sytost. Volba barvy je spíše subjektivní záležitost. Záznam byl pořízen na černém podkladu s tím, že vlastní kouř byl šedivý. Změna barvy měla vždy pozitivní vliv, ať to bylo na červenou nebo na modrou. Po tomto kroku se znova provedla korekce kontrastu a jasu, tentokrát už jen malá, ale vždy se tím obraz ještě vylepšil. Tyto úpravy byly prováděny jak za použití běžného softwaru k přehrávání videí (windows media player), tak za pomoci softwaru i-SPEED PC. Výsledky byly prakticky stejné, a na kvalitu neměl použitý software vliv. Zviditelnění rysů proudění, které byly na začátku úprav skryté se úspěšně podařilo pomocí obou softwarů. Pro podrobnější analýzu je ovšem vhodnější software Olympus i-SPEED PC, které kromě výše zmíněného nabízí i určení polohy, rychlosti a zrychlení. Na Obr. 5-4 je vidět zleva postupná úprava získaného videa. První je bez úprav, druhé je se změnou kontrastu a jasu, a třetí je se změnou kontrastu, jasu, barvy a její sytosti.



Obr. 5-4

6 Metody vizualizace

Sledování pohybu tekutin pomocí kouře a barvy je nejstarší vizualizační technika datující se až k Leonardovi da Vinci. Je to levná a relativně jednoduchá technika. Některé hlavní objevy v mechanice tekutin byly získány právě těmito technikami. Klasickým příkladem je Osborne Reynolds, který použil barvivo ke zviditelnění přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním v trubici (rok 1883) viz Obr. 6-1.[2]

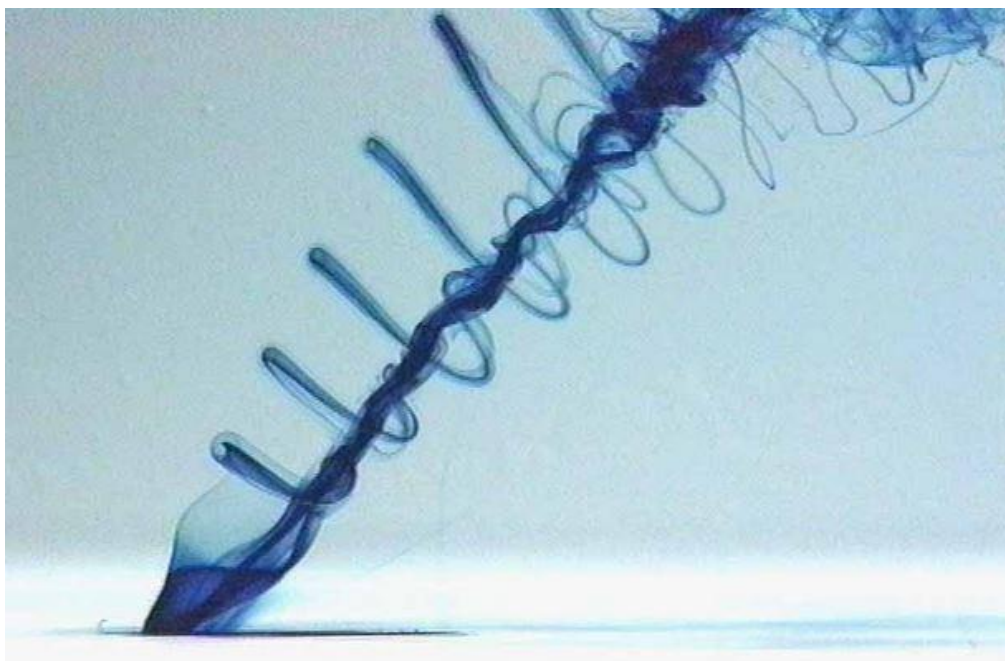


Obr. 6-1 [3]

6.1 Metody vizualizace v kapalině

6.1.1 Klasické barvení

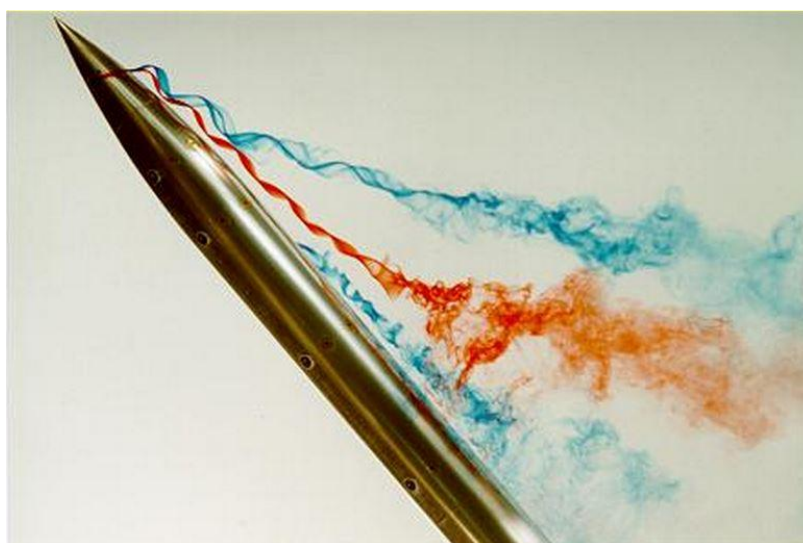
Vpouštění barviva do proudu kapaliny je velmi jednoduchá a efektivní metoda vizualizace viz Obr. 6-2 [6]. Nejčastěji je použita potravinářská barva, protože je bezpečná (uživatel si nemusí chránit ruce a jiné části těla) a je snadno dostupná. Výběr barvy je záležitostí osobní preference, ale měla by se použít barva jako červená, modrá, nebo zelená, protože tyto barvy poskytují dobrý kontrast. Běžně prodávaná potravinářská barva je koncentrovaný roztok s poměrem své hustoty ku hustotě vody větší než jedna. Pokud z ní neuděláme roztok vznášející se ve vodě, barva nebude následovat proudové pole a získáme špatné výsledky vizualizace. K vytvoření rovnováhy hustot se přidá do roztoku malé množství alkoholu (methanolu nebo ethanolu). Přidání správného množství alkoholu je potřeba vyzkoušet. Když se povede namíchat roztok barviva a alkoholu o správné hustotě může být zředěn s pracovní kapalinou, aby se vyrovnaly jejich teploty. Velký teplotní rozdíl mezi (barvivem/alkoholem) a pracovní látkou může způsobit změnu hustot, a tak nežádoucí efektu vztlaku. Množství barvy, která má být rozpuštěna v pracovní látce závisí především na použité aplikaci. Velká koncentrace může zastřít charakteristické rysy proudění, zatímco malá koncentrace může způsobit snížení kontrastu.[2]



Obr. 6-2 [6]

6.1.1.1 *Metody vypouštění barvy do proudu*

Jsou různé metody jak zavést barvivo do proudění. Nejčastěji se používá injekční jehla nebo nerezová trubička o průměru 1,5 - 2 mm Obr. 6-3 [6]. Výhoda těchto technik je, že se sonda může snadno pohybovat v proudění a barva může být vypuštěna v konkrétním místě. Naopak nevýhoda je, že sonda může narušit proudové pole. Ke zmenšení tohoto efektu se proto sonda umísťuje v určité vzdálenosti od místa pozorování. Barva je do sondy obvykle dodávána tíhou gravitačního pole, nebo tlakovou nádobkou. První varianta je jednoduchá na praktické použití, ale někdy může být výhodnější použít variantu druhou, která poskytne stále stejné množství vstříkované barvy, které není závislé na výšce hladiny v zásobníku barvy. Dále je důležitá rychlost jakou opouští barvivo sondu. Měla by být stejná jako je rychlost proudění kapaliny v okolí sondy, aby neovlivnila proudové pole. Při nalezení správné rychlosti bude proud barviva vypadat jako vyhlazené vlákno.[2]



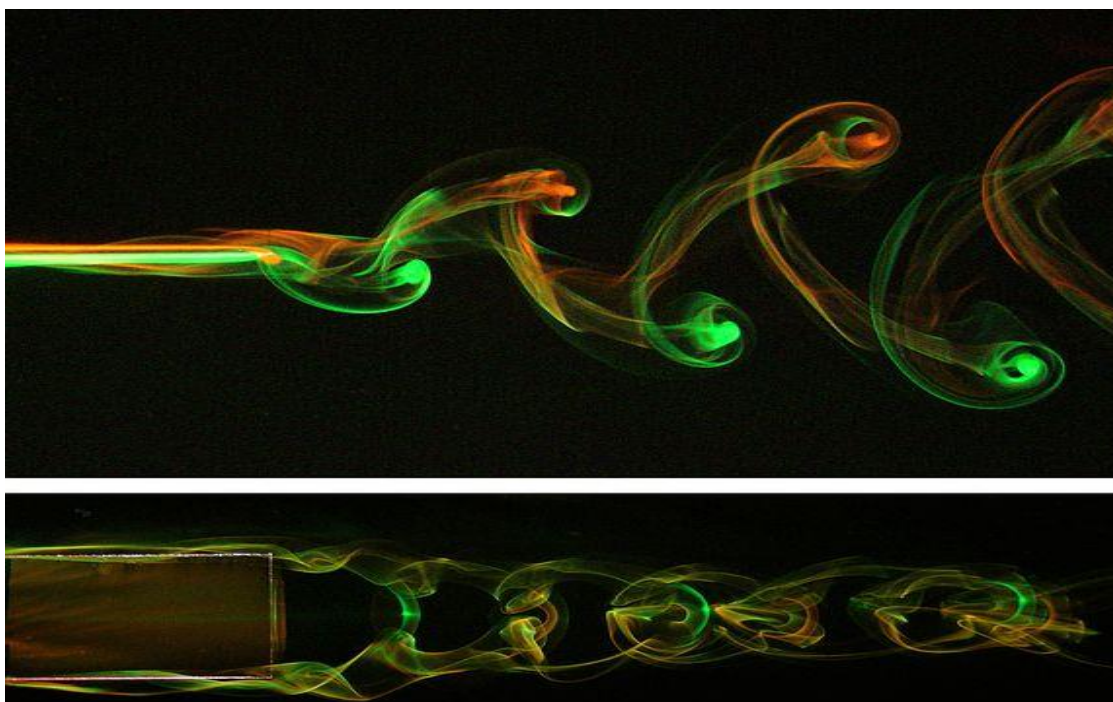
Obr. 6-3 [6]

6.1.2 Mléko

Mléko je další médium, kterým se vizualizuje proudění. Je oblíbené z důvodu jeho dobré optické odrazivosti, čímž pomáhá zlepšit kontrast. Je používáno v přírodním stavu-bíle, nebo je k němu přidána potravinářská barva pokud je potřeba rozlišit části proudového pole. Důvod proč nepoužívat pouze barvivo, ale použít barvivo smíchané s mlékem je ten, že mléko obsahuje tuk, který zpomaluje difuzi barvy ve vodě. Tato technika byla vytvořena pro studium vysoko smykového proudění, kde samotné barvivo difunduje snadno. Nevýhoda použití mléka je, že po skončení experimentu musí být dobře vypláchnuto ze systému, protože se může srazit a ucpat vstřikovací a jiné otvory.[2]

6.1.3 Fluorescenční barva

Fluorescenční barva vypadá jako téměř průhledná, ale pokud je osvětlena světelným zdrojem vhodné vlnové délky silně světélkuje viz Obr. 6-4 [5]. Tato unikátní vlastnost je velmi vhodná pro využití při vizualizaci vnitřních struktur proudění kapalin za pomoci osvětlování laserovou rovinou.[2]



Obr. 6-4 [5]

6.1.4 Rheoscopic fluid

Tato kapalina byla původně vynalezena Paulem Matissem pro použití v jeho umělecké tvorbě. Od té doby byla úspěšně použita k vizualizaci ve fluidní mechanice viz Obr. 6-5 [7]. Kapalina obsahuje mikroskopické krystaly guaninu, které mají průměrnou velikost $60 \times 30 \times 0,07$ mikrometrů a hustotu $1,62 \text{ g.cm}^{-3}$. Jejich pomalá rychlost usazování (přibližně $0,1 \text{ cm.hod}^{-1}$ v klidné vodě) a reflexní chování je dělájí zajímavé pro aplikace vizualizací. Princip spočívá v tom, že tyto



Obr. 6-5 [7]

„destičky“ se v kapalině sladí se směrem místního smykového napětí a jejich orientované plošky se budou pozorovateli jevit jako „svítící“ (budou se jevit jako bílé). Zatímco ostatní hranky orientované jinými směry se budou jevit jako tmavé.[2]

6.1.5 Electrolytic precipitation

Tato technika se využívá pouze u vody a vhodná je pro malé rychlosti (okolo $0,1$ až $5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$). Princip je založen na elektrolýze. Je stejný jako u HBV s tím rozdílem, že na anodě jsou vyprodukované malé kovové bílé částice (o velikosti $1\mu\text{m}$) a pokud jsou tyto nasvícené vypadají jako bílý kouř. Používá se napětí 10 V a proud 10 mA při rychlosti volného proudu $5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud se rychlost proudění zvyšuje, musí se pro udržení množství kouře zvýšit i proud. Tato technika má výhodu oproti metodě vypouštění barviva, protože nevnáší takové turbulence do proudového pole. Nevýhoda techniky je, že se dá dobře použít pouze pro horizontální vodní kanál Obr. 6-6 [8]. Pro vertikální je potřeba použít solný můstek.[2]



Obr. 6-6 [8]

6.1.6 Hydrogen Bubble Visualization

Vizualizace pomocí vodíkových bublin. HBV poskytuje relativně jednoduchý a levný způsob vizualizace. Princip je takový, že pomocí elektrolýzy jsou generovány malé vodíkové bubliny, které tvoří roviny či přímky v proudovém poli vody viz Obr. 6-7. Vodíkové bubliny jsou vytvářeny použitím velmi jemného vodivého drátu ($25\text{--}50\mu\text{m}$) protáhnutého mezi dvěma vodičnými podporami. Takto se vytvoří jedna elektroda elektrolytického obvodu. Druhá svorka pro uzavření elektrického obvodu je obvykle kovová nebo uhlíková elektroda umístěná na jiném místě ve vodě. Při zapojení obvodu tak, že drát je zápornou elektrodou se na něm budou vytvářet malé vodíkové bubliny, které budou následně unášeny proudem vody, čímž umožní vizualizaci proudění. Velikost bublin se rovná řádově polovině až průměru použitého drátu, proto tyto bubliny nemají v podstatě žádný vliv na zvýšení rychlosti v okolí drátu. Pokud použijeme drát jako kladnou elektrodu, budou se zde vytvářet bublinky kyslíkové. Obecně je generování kyslíkových bublin nežádoucí, protože se jím získá pouze poloviční množství bublin oproti bublinám vodíkovým. Při použití stejného průměru drátu mají větší průměr než bubliny vodíkové, a toto pak může vytvořit zrnitý obraz. Dále je zde problém vztlaku. Jedna z výhod HBV je její univerzálnost. HBV sondy mohou být umístěny prakticky kdekoli a mají pouze zanedbatelný vliv na rušení proudového pole. Metoda může poskytnout kvantitativní data použitím pulzujícího napětí, které vytvoří časové přímky z bublin. Tyto můžou být zaznamenány a zpracovány. Omezení metody spočívá v tom, že je použitelná pouze pro relativ-

ně nízká Reynoldsova čísla. Další problém je, že bubliny začínají v určité vzdálenosti od sondy disipovat a tím je omezena oblast efektivní vizualizace.[2]



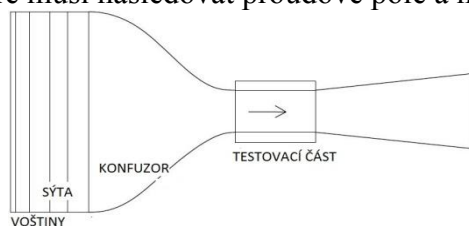
Obr. 6-7 [9]

6.2 Metody vizualizace ve vzduchu.

6.2.1 Vizualizace pomocí kouřového tunelu

Vizualizace proudění v kouřovém tunelu se používá v mnoha aplikacích. Pro tyto musí být tunel správně navržen a sestrojen. Schéma tunelu je na Obr. 6-8. Dobře navržený kouřový tunel má mít úroveň turbulencí nejlépe řádu 0,02 %. Tunel je složen z několika základních částí. První část je složena z voštin a několika sítí. Účel voštin je rozbít velké turbulence vstupující do tunelu. Síta mají za úkol další redukci turbulencí. Měla by být uspořádána tak, aby velikost mřížky klesala ve směru pohybu vzduchu. Další část je konfuzor, který má za úkol další redukci turbulencí a má zajistit, aby profil vstupující do testovací části byl pístový.

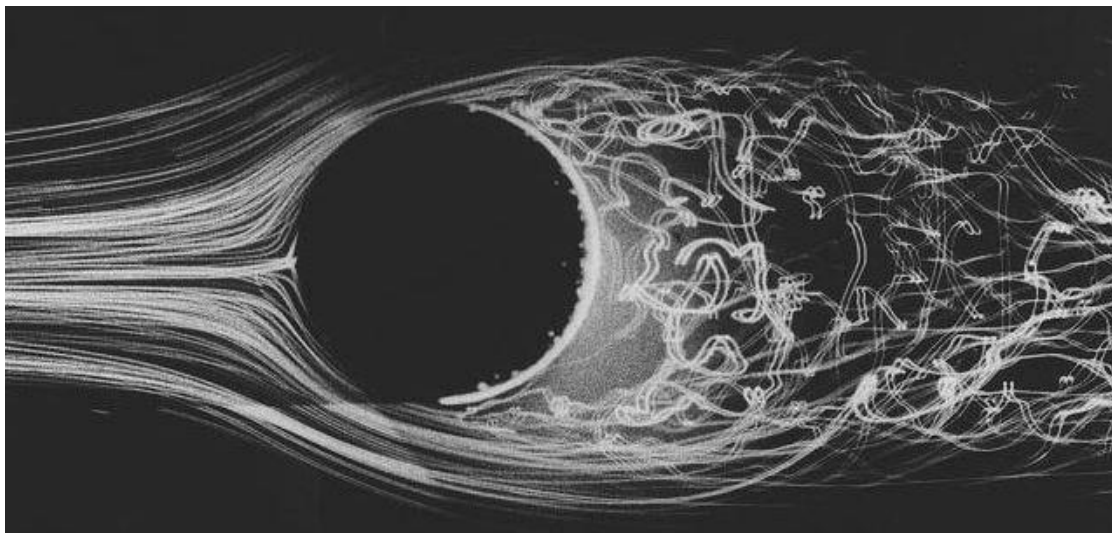
Kompresní poměr, který je definován jako poměr plochy sacího ku výstupnímu otvoru je u kouřového tunelu větší než u tunelů aerodynamických. Obvykle v rozsahu od 9 do 96. Konfuzor je velmi důležitá část kouřového tunelu a proto musí být jeho návrhu věnována náležitá pozornost. Příliš velká komprese může způsobit oddělení proudění. Malá komprese způsobí zvětšení hranic vrstev. Kouř vpouštěný do tunelu může být generován pálením dřeva, tabáku, nebo olejů a musí splňovat několik požadavků. Nesmí být toxický. Měl by být z reflexních částic. Dále pak částice kouře musí následovat proudové pole a nesmí ho příliš ovlivňovat.[2]



Obr. 6-8

6.2.2 Vizualizace proudění pomocí héliových bublin

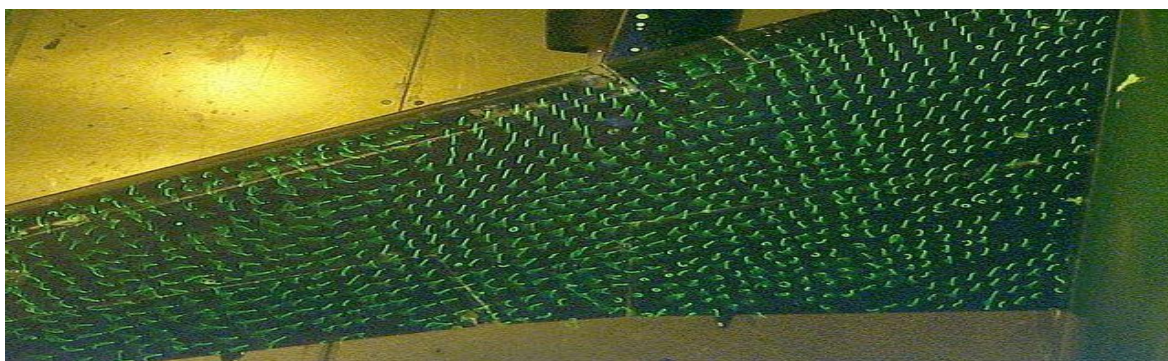
Vizualizace proudění vzduchu pomocí mýdlových bublin plněných héliem začala okolo roku 1950. Héliové bubliny mají průměr 1 - 3 mm a jejich hustota je přibližně stejná jako hustota vzduchu. Díky tomu dobře následují proudové pole. Bez porušení dokáží projít okolo lopatek ventilátorů a mohou být použity až do rychlosti zvuku. Při jejich výrobě je použit plastifikátor, který prodlouží jejich životnost na několik minut. Při experimentu jsou bubliny osvětlovány ve směru pohybu proudění a jejich pozorování je prováděno kolmo na směr proudění tak, jak je ukázáno na Obr. 6-9. [12]



Obr. 6-9 [10]

6.2.3 Vizualizace proudění pomocí nit'ových sond

Pomocí nit'ových sond se provádí vizualizace proudění v blízkosti povrchů křidel letadel, karosérií automobilů a jiné. Metoda se používá i v hydrodynamice. Vlákná jsou připevněna k povrchu a je sledován jejich směr a pohyb. Při laminárním proudění vlákna ukazují směr vektoru rychlosti. Při turbulentním proudění mají vlákna trhavý pohyb. Rychlost proudění by měla být vyšší než $1 - 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aby výsledek experimentu nebyl ovlivněn mechanickými vlastnostmi materiálu a tíhovým zrychlením. Neoptimálnější rychlost, kdy už tyto faktory nemají téměř žádný vliv je dle Merzkircha [11] okolo $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Obvyklá délka používaných vláken je do 2 cm. Na Obr. 6-10 je vidět jedna z možných vizualizací touto metodou. [12]



Obr. 6-10 [11]

7 Vlastní experiment vizualizace

Praktická část práce spočívala v pořízení vlastního záznamu vizualizace proudění. Měření bylo provedeno na dvoumédiovém atomizéru, který směšuje vzduch s olejem a tím vytváří olejový sprej o částicích velmi malého průměru. Měření bylo rozděleno do dvou úkolů, které jsou dále popsány v podkapitolách 7.1 *Měření trysky v různých režimech jejího provozu* a 7.2 *Měření v krajních režimech provozu kamery*.

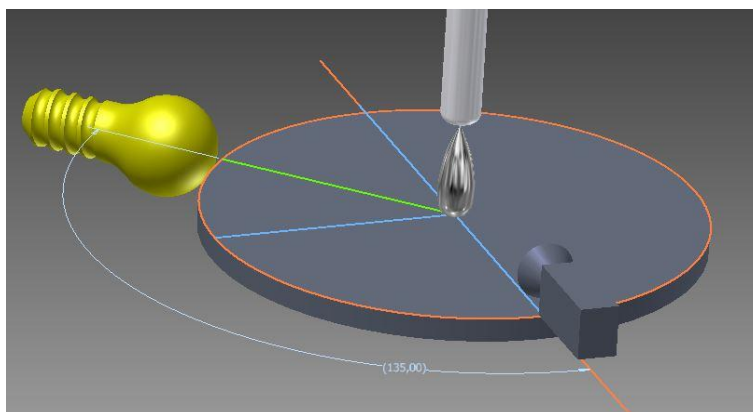
7.1 Měření trysky v různých režimech jejího provozu

První úkol měření spočíval v pořízení záznamů spreje v různých režimech provozu atomizéru. Předchozí měření velikosti kapiček ukázalo značně rozličné výsledky. Byly zjištěny velikosti kapiček o průměru od 0 do $270\ \mu\text{m}$. Takto velký rozsah velikostí neodpovídal předpokladům. Proto byla aplikována VR kamera, aby pomohla přiblížit pohled na daný problém.

7.1.1 Příprava měření

Měření bylo provedeno výše zmíněnou kamerou a jako její ovládání byl použit připojený notebook se softwarem Olympus i-SPEED PC. Příprava měření spočívala v první řadě v nalezení vhodné polohy kamery a osvětlení vzhledem k poloze trysky. Kamera byla umístěna na stativ, přibližně do výše trysky, a to proto, aby objektiv směřoval kolmo na směr proudu. Vzdálenost objektivu od scény byla přibližně $65\ \text{cm}$. Na Obr. 7-1 je situační schéma daného uspořádání. Za snímanou plochu bylo umístěno černé matné pozadí pro zvýšení kontrastu záznamu. Osvětlení bylo provedeno LED diodovým světlem o příkonu $2000\ \text{W}$. Světlo bylo umístěno na stativ do výše kamery a jeho nejlepší poloha se hledala až se zapnutím kamery a spuštěním trysky. Objektiv byl zvolen dle vybavení příslušenství kamery PENTAX TV LENS $25\ \text{mm}\ 1:1.4$. Kamera byla zapnuta a bylo provedeno její základní nastavení. Na stativu byla otočena o 90° ve vertikální rovině, aby se využil formát jejího záznamu, který je standartně orientován na šířku, ale protože tryska směřuje proud svisle dolů, bylo hodné toto nastavení pro lepší využití snímané plochy. Dále bylo provedeno zaostření na výstup z trysky. Snímkový kmitočet byl jako výchozí zvolen 1000 snímků za sekundu. Čas závěrky byl zvolen 1x .

Pro nalezení ideálního nasvícení byla spuštěna tryska a na monitoru notebooku byl zobrazen živý obraz. Postup nalezení ideální polohy byl proveden stejně, jako je popsáno v kapitole 5.5 *Osvětlení*. S tím rozdílem, že pro zkvalitnění nasvícení scény bylo vyzkoušeno použití zrcadla, které odráželo světlo procházející proudem ještě jednou zpět a mělo tak zvýšit světlost záznamu. Ovšem použití zrcadla nemělo praktický žádný vliv, a proto nebylo dále při experimentu používáno. S ohledem na konstrukční řešení a možnosti přístupu bylo zvoleno nasvícení v horizontální rovině objektivu pod úhlem 120° a vzdálenosti $1\ \text{m}$ od trysky. Toto řešení poskytovalo za daných podmínek nejlepší nasvícení scény.



Obr. 7-1

7.1.2 Vlastní měření

Pro získání objektivních výsledků měření, které se dají mezi sebou porovnat, bylo požadováno najít optimální nastavení kamery pro daný problém a s tímto pořídit sérii záznamů, kde budou měněny pouze parametry trysky a ne parametry kamery.

Pro nalezení optimálního nastavení kamery bylo provedeno několik záznamů se stejným nastavením parametrů trysky a různým snímkovým kmitočtem a časem závěrky. Po tomto byly záznamy uloženy a upraveny pro zviditelnění struktury stejně, jak je popsáno v kapitole 5.6 *Změna kontrastu, jasu, barvy*. Záznamy byly vyhodnoceny a jako nejvhodnější nastavení kamery pro byl zvolen snímkový kmitočet 1500 snímků za sekundu a čas závěrky 1x.

Tímto nastavením kamery bylo systematicky pořízeno 12 záznamů pro různé nastavení trysky, které spočívalo ve změně tlaku vzduchu od 0,1 do 0,5 MPa a změně směšovacího poměru GLR od 2 do 10%.

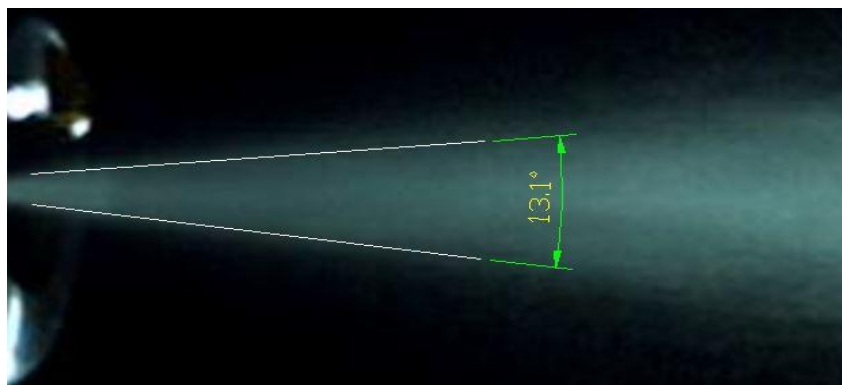
7.1.3 Analýza záznamu

Záznam byl po získání upraven pro zviditelnění struktury tak, jak je popsáno v kapitole 5.6 *Změna kontrastu, jasu, barvy*.

Na záznamu je vidět hlavní proud proudění jdoucí středem obrazu. Jeho rychlost je vysoká, a tak se i při zpomaleném záznamu jeví rozmazaně. Hlavní proud není kontinuální, ale na videu (viz příloha) a Obr. 7-3 můžeme vidět, že se šíří v krátkých pulzech. Déle jsou zde vidět jednotlivé malé kapičky oleje vystupující z trysky do širšího okolí hlavního proudu. Tyto mají menší rychlost a jsou strhávány proudem spolu s okolním vzduchem.

Záznam dále odhalil skutečnost, že se tryska při některých režimech pravděpodobně zahlučuje olejem. Po nějaký čas pracuje normálně, a potom dojde k zahlcení. Přestane vytvářet olejovou mlhu a místo toho vytryskne menší rychlostí kapky oleje o velikosti 1-2 mm viz Obr. 7-4. Potom opět pracuje standardním způsobem a rychlý proud mlhy dostihne kapky oleje, které jsou tímto strženy a lehce rozmělněny. Tento cyklus se opakuje přibližně 60krát až 70krát za sekundu v závislosti na nastavení parametrů trysky. Obr. 7-4 zachycující tento děj je upraven do negativu (viz Obr. 7-5) pro lepší rozlišení proudu oleje od olejové mlhy.

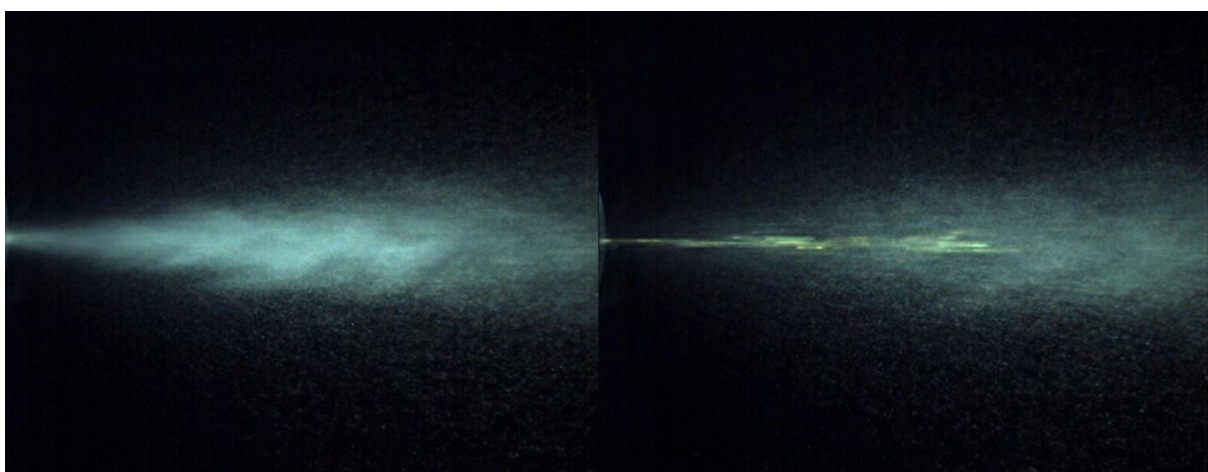
Dále bylo provedeno měření úhlu, pod kterým sprej vystupuje z trysky. Měření bylo provedeno na záznamu číslo 6 (viz příloha). Ze záznamu byl vybrán snímek (viz Obr. 7-2), který byl přenesen do programu AutoCAD. S pomocí použití kóty *úhel* byla hodnota úhlu změřena na 13,1°. Velikost jeho odchylky je dána tím, jak přesně jsme schopni určit ze záznamu hranice spreje a jaká kritéria jsou pro hranice zvolena.



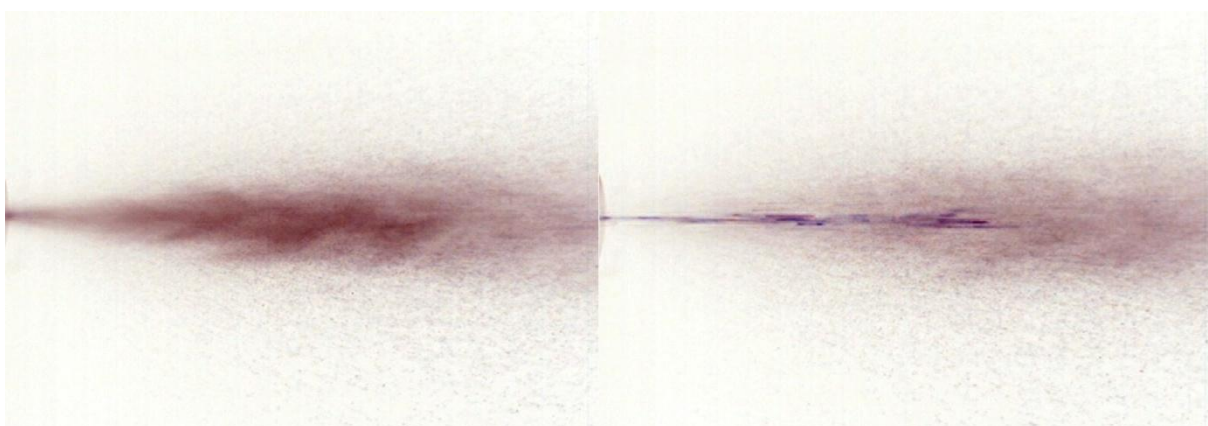
Obr. 7-2



Obr. 7-3



Obr. 7-4



Obr. 7-5

7.2 Měření v krajních režimech provozu kamery

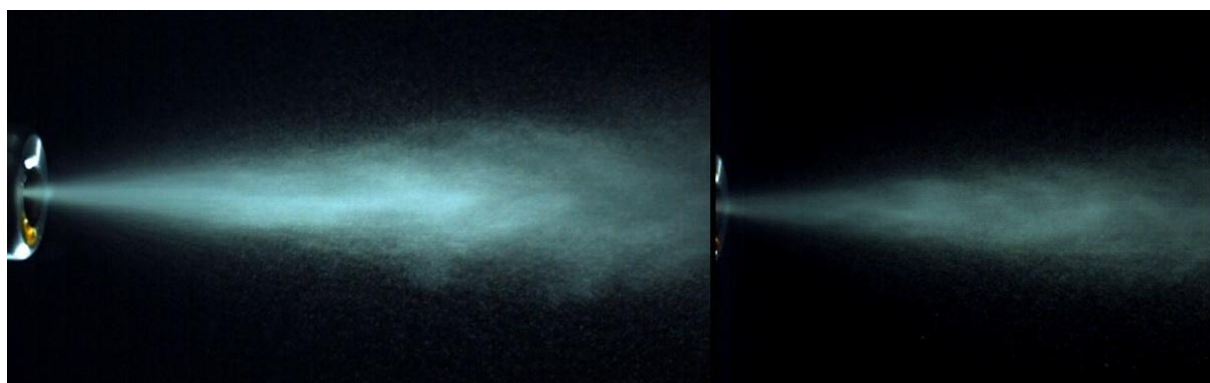
Druhý cíl měření spočíval v nalezení krajních nastavení režimů kamery, které ještě budou přínosné pro získání informací o daném problému. Nastavení osvětlení a umístění kamery bylo ponecháno stejně, jako je popsáno v kapitole 7.1.1 *Příprava měření*. Nastavované parametry byly snímkový kmitočet a délka závěrky.

7.2.1 Snímkový kmitočet

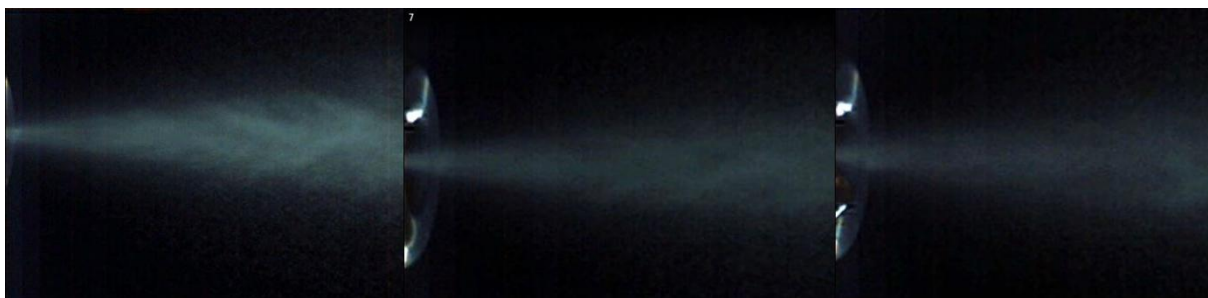
Snímkový kmitočet byl postupně zvyšován od 1000 až po 33000 snímků za sekundu. Po celou dobu byla použita závěrka 1x. Se zvyšováním snímkového kmitočtu se zmenšovalo zorné pole, a proto musela být kamera vždy po nastavení konkrétní hodnoty FMR nastavena na stativu tak, aby zabírala výstup z trysky.

Všechny získané záznamy byly upraveny pro zviditelnění struktury tak, jak je popsáno v kapitole 5.6 *Změna kontrastu, jasu, barvy*.

Na záznamech do 2000 FMR je struktura proudu dobře viditelná viz Obr. 7-6, pro FMR do 8000 je kvalita obrazu horší, již není vidět tolik detailů viz Obr. 7-7. Použití vyššího FMR než 8000 už docela významně zmenšuje zorné pole a snižuje světlost viz Obr. 7-8. Zleva 10 000 FMR, 15 000 FMR, 20 000 FMR, ale i záznamy s takto vysokým snímkovým kmitočtem mohou poskytnout dobrý pohled na výstup z trysky, kde jsou rychlosti největší. Například na záznamu číslo 10 (viz příloha), který je pořízen při 15 000 FMR se podařilo detailněji zachytit, jak se proud o velké rychlosti náhle ztrácí a místo něj z trysky začnou vycházet pouze velké kapky oleje o rychlosti nižší viz Obr. 7-9 (tento obrázek byl dále upravován viz Obr. 7-10 a Obr. 7-11 pro zvýraznění struktury pomocí zaostření hran a podsvětlení). Dále je i zde vidět, že proud není kontinuální, ale vystupuje z trysky s pulzacemi. Rozlišení je v tomto případě pouze 160 x 120 bodů, ale i tak může být záznam použit například pro změření rychlostí těchto velkých kapek oleje. Na záznamech s 20 000 FMR a vyšších už je rozlišení tak malé, že neposkytuje téměř žádné informace.



Obr. 7-6 Zleva 1000 FMR, 2000 FMR



Obr. 7-7 Zleva 4000FMR, 6000 FMR, 8000 FMR



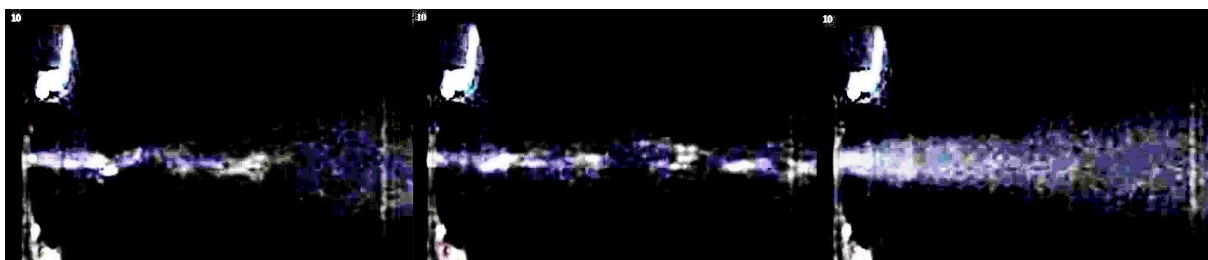
Obr. 7-8 Zleva 10 000 FMR, 15 000 FMR, 20 000 FMR



Obr. 7-9 15000 FMR, Přechod proudu olejové mlhy do velkých kapek oleje



Obr. 7-10 1500 FMR, upraveno zvýrazněním hran



Obr. 7-11 1500 FMR, upraveno změnou podsvětlení

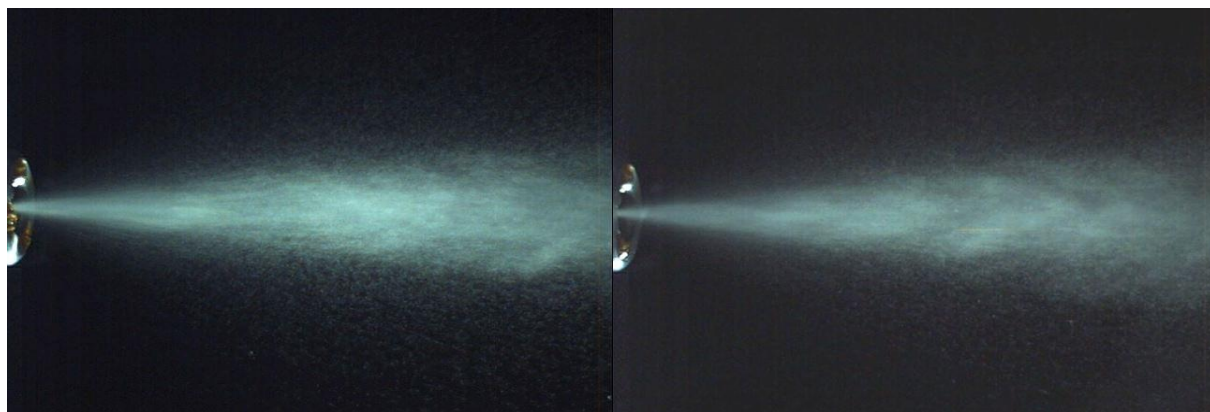
7.2.2 Čas závěrky

Změna času závěrky byla prováděna při konstantním snímkovém kmitočtu, aby se zaznamenaná data mohla objektivně porovnat. Byl zvolen kmitočet 1500 snímků za sekundu, protože jeho formát 672 x 504 bodů dokázal zachytit celou plochu snímaného děje a byla s ním s uspokojivými výsledky provedena předchozí měření trysky (kapitola 7.1 *Měření trysky v různých režimech jejího provozu*). Čas závěrky se postupně měnil od maximálního do minimálního tak, jak to umožňuje řízení kamery (1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x).

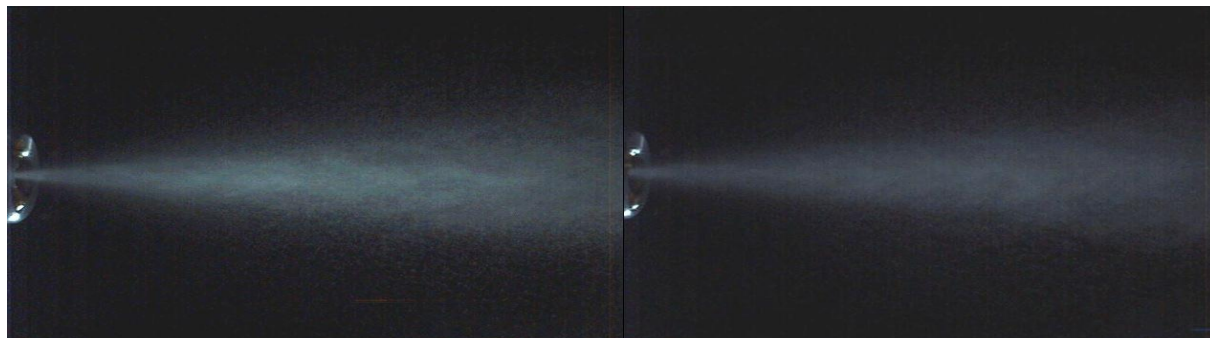
Všechny záznamy byly po uložení upraveny pro zviditelnění struktury tak, jak je popsáno v kapitole 5.6 *Změna kontrastu, jasu, barvy*. Bez těchto úprav se záznamy s časem závěrky 3x a kratším jeví téměř úplně tmavé.

Při měření se jako nejvhodnější ukázaly časy závěrky 1x a 2x, kdy je dobře vidět pohyb proudu i kapiček v jeho okolí viz Obr. 7-12. Pro závěrky s časem 5x a 10x se podmínky výrazně zhoršují a zviditelnění vyžaduje výrazné zvýšení kontrastu a jasu, aby záznam přinesl nějaké informace viz Obr. 7-13. Použití časů závěrky 20x, 50x, 100x už nebylo vhodné, protože i s velkými úpravami obrazu nebylo proudění příliš viditelné viz Obr. 7-14.

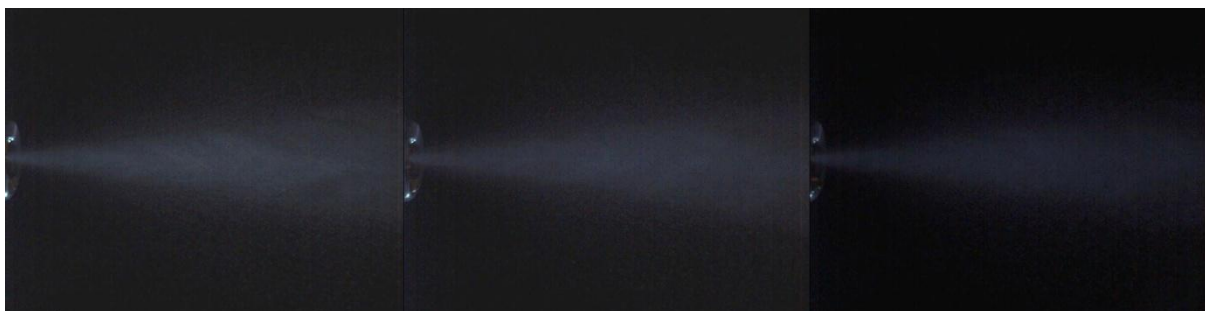
Obecně by bylo vhodné pro kratší časy závěrky (10x až 100x) scénu lépe nasvítit, protože se snižováním času závěrky se nezmenšuje rozlišení jako při zvyšování snímkového kmitočtu a to že je záznam nekvalitní je způsobeno hlavně nedostatkem osvětlení. Množství světla, které dopadne na jednotkovou plochu čipu kamery při použití závěrky 10x při 1500 FMR je teoreticky stejné jako při použití závěrky 1x a snímkového kmitočtu 15 000. Snímkový kmitočet 15000 se ukázal v této práci za daných podmínek jako limitní pro získání informací. Z toho vyplývá, proč jsou záznamy s časem závěrky 20x až 100x téměř nepoužitelné. Pro takto krátké závěrky je třeba osvětlení zvýšit teoreticky 2krát až 10krát, nebo jej lépe zaostřit.



Obr. 7-12 Zleva-čas závěrky 1x, 2x



Obr. 7-13 Zleva čas závěrky 5x, 10x

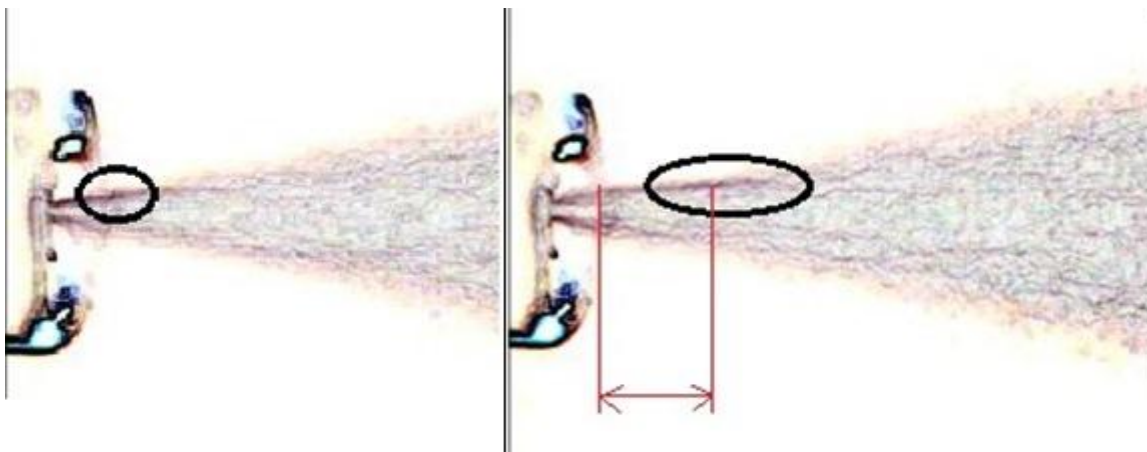


Obr. 7-14 Zleva čas závěrky 20x, 50x, 100x

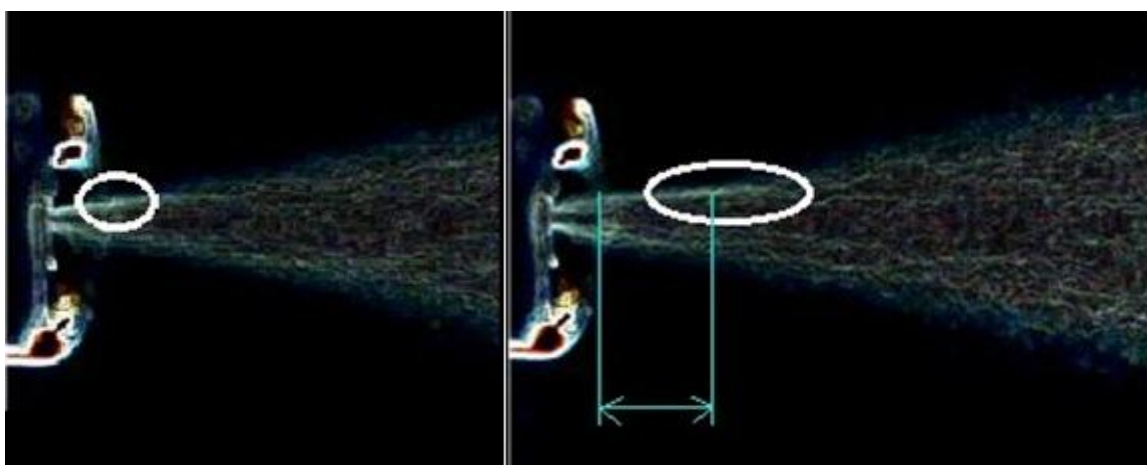
Všechny záznamy byly pořízeny s parametry trysky $p = 0,3 \text{ MPa}$ a $\text{GLR} = 5\%$. Záznam číslo 2 s časem závěrky 2x byl dále analyzován a byla u něj určována rychlost spreje v závislosti na vzdálenosti od výstupu z trysky. K tomuto byl použit program Windows Live Movie Maker, protože dokáže záznam dobře zviditelnit pomocí funkce *zjištění okraje*, a tím umožní sledovat nepravidelné struktury tvořící se u výstupu z trysky a jejich další pohyb. Program standardně přehrává video rychlostí 25 snímků za sekundu. Pokud jím spustíme video nahrané vysokorychlostní kamerou snímkovou frekvencí 1500 snímků za sekundu, bude video zpomalené $1500/25 = 60$ krát. Funkcí pro pomalejší přehrávání video můžeme zpomalit ještě 8krát. Tímto se dosáhne celkového zpomalení přehrávání na hodnotu $60 \cdot 8 = 480$ krát. Při této hodnotě je možno video posouvat po snímcích, přičemž relativní časová vzdálenost mezi jednotlivými snímky je $0,32 \text{ s}$. Protože je ale záznam již 480krát zpomalen, skutečná doba mezi dvěma snímky je $0,32/480 = 0,66 \text{ ms}$. Je to jednoduchá úvaha a jako kontrola může posloužit to, že pokud kamera snímá 1500 snímků za sekundu, tak časová vzdálenost mezi snímky je $1/1500 = 0,66 \text{ ms}$. Na Obr. 7-15 a Obr. 7-16 je ze snímku vybrána část spreje, který byl dost kontrastní na to, aby ho bylo možno identifikovat i na snímku dalším a tím mohla být určena jeho změna polohy v čase. Po tomto byly snímky vloženy do programu AutoCAD a byla změřena vzdálenost, o jakou se tato vybraná část posunula. Změřená vzdálenost musela být přepočítána pomocí měřítka, kde jako výchozí rozměr sloužil známý průměr trysky. Následně byla z těchto údajů vypočítána průměrná rychlost, která je v tomto případě přibližně $20,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Otázkou zůstává přesnost zjištěné hodnoty, kde jako hlavní možná příčina chyby figuruje lidský faktor, který vizuálně identifikuje měřenou strukturu a její polohu. Tato struktura je relativně dobře viditelná, a to znamená, že se odlišuje od struktury s větší četností výskytu. Můžeme proto například měřit relativně větší kapičku oleje, která nám podá zkreslenou představu o tomto ději. Další zdroj chyby může být to, že se proudění pohybuje trojrozměrně, ale počítána je jen rychlost v průmětu směru objektivu. Dále je tato rychlost měřená na povrchu, a tak rychlost uvnitř proudu může být mnohem vyšší.

Postupem popsaným výše byla určena rychlost několika částic viz Tab. 7-1, a její velikost byla vynesena do grafu (viz Graf 7-1) v závislosti na vzdálenosti částice od výstupu z trysky. V grafu jsou vidět relativně velké fluktuace rychlostí, které jsou způsobeny právě faktory popsanými výše.



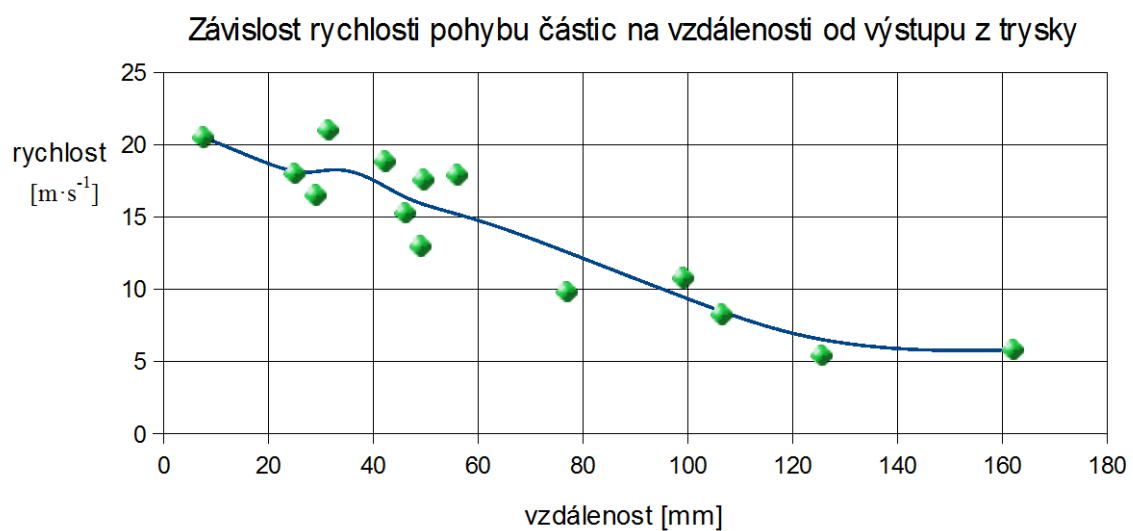
Obr. 7-15 Zviditelnění struktury pomocí funkce zjištění okraje.



Obr. 7-16 Obráz vycházející z Obr. 7-15 upravený do negativu.

Vzdálenost od trysky [mm]	7,5	25	29	31,4	42,2	46	49	49,5	56	77	99,1	106,4	125,5	162
Průměrná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	20,5	18	16,5	21	18,8	15,2	12,9	17,5	17,9	9,8	10,7	8,3	5,4	5,8

Tab. 7-1



Graf 7-1

8 Závěr

V této práci byla úspěšně realizována vizualizace proudění olejového spreje dvoumédiového atomizéru. Bylo nalezeno optimální nastavení kamery pro rychlé a efektivní vytvoření záznamů proudění, kterému odpovídá použití snímkového kmitočtu 1500 snímků za sekundu a času závěrky 1x. S tímto nastavením se podařilo popsat strukturu proudění spreje v různých režimech provozu trysky a odhalit, že se tryska v některých režimech provozu zahlučuje olejem a tudíž nepracuje podle předpokladů. Dále byl změřen úhel kužele spreje (pro záznam č.6), a jeho hodnota byla určena na $13,1^\circ$.

Pro speciální požadavky je možné základní nastavení kamery upravit tak, jak je popsáno v kapitole 7.2 *Měření v krajních režimech provozu kamery* a využít maximálně možnosti kamery pro konkrétní problém. S takovýmto nastavením byl pořízen detailní záznam výstupu oleje z trysky při jejím zahlcení při 15000 FMR viz Obr. 7-10. Dále byla změřena rychlost kapiček ve spreji, a do grafu (viz Graf 7-1) byly vyneseny hodnoty velikosti rychlostí kapiček v závislosti na vzdálenosti od výstupu z trysky. Velikost rychlosti na výstupu z trysky se pohybovala okolo $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Toto měření bylo provedeno se snímkovým kmitočtem 1500 snímků za sekundu a časem závěrky 2x.

U všech analyzovaných záznamů byl upraven kontrast a jas, protože tyto změny mají velký vliv na kvalitu získaných informací. Pro další úpravy a zviditelnění struktury je vhodné vytvořit ze záznamu negativ a použít funkcí na zvýraznění hran.

V seznamu příloh jsou videa pořízená při experimentu, která ho celý dokumentují. Tímto jsou cíle práce splněny.

9 Seznam použité literatury

- [1] PATA, V.: Vysokorychlostní kamerové systémy. 1. vydání Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2006. 92s. ISBN 80 - 7204 - 480 -X
- [2] SMITS, A. J. a LIM, T. T. Flow Visualization : Techniques and examples. London : Imperial College Press, 2003. ISBN 1-86094-193-1.
- [3] Reynolds observations turbulence. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 16 March 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reynolds_observations_turbulence_1883.svg
- [4] Obchodný dom. *Obchodny dom* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.obchodny-dom.sk/filter-tiffen-62cp-cierny/z197845/>
- [5] Art of science. BUCHHOLZ, James a Alexander SMITS. *Princeton University* [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.princeton.edu/artofscience/gallery/view.php%3Fid=94.html>
- [6] National University of Singapore. *Elliptic jet in cross flow* [online]. 2003 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://serve.me.nus.edu.sg/limtt/>
- [7] Taylor-vortex reactor. In: RICHTER, Oliver, Heike HOFFMANN a Bettina KRAUSHAAR-CZARNETZKI. *Effect of the rotor shape on the mixing characteristics of a continuous flow Taylor-vortex reactor* [online]. 2008 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908001796>
- [8] Tin-Oxide Precipitation. In: *Electrolytic techniques* [online]. 1977 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.docstoc.com/docs/document-preview.aspx?doc_id=97102727
- [9] KLINE, Steve. *Turbulence Research* [online]. 2009 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://sites.lafayette.edu/sabatind/files/2010/06/fig2_1.jpg
- [10] *Visible Dynamics AB: Fluid Mechanics* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.vidix.se/Fluid_Mech.htm
- [11] Wind tunnel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wing_with_minifufts.jpg
- [12] ĎURDINA, L. Metody vizualizace proudění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 45 s.
- [13] KOLOMAZNÍK, P. Metodika zkoumání rychlých a stochastických mechanických dějů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.
- [14] High-speed photography: Rotary prism. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2009 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_photography#Rotary_prism
- [15] WP's block diagram of the HYCAM rotating prism high-speed camera. *PTS Walter Preiss Technology Systems* [online]. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/slomo_hy.htm
- [16] Rotating mirror concept. *Cordin* [online]. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.cordin.com/refrotmirror.html>
- [17] Vysokorychlostní kamery. *Olympus* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/cs/hsv-products/>

10 Seznam použitých zkratk a symbolů

CCD	záznamový čip
CDU	univerzální řídicí jednotka
CMOS	záznamový čip
f	ohnisková vzdálenost
FMR	počet snímků za sekundu
FPN	pevný obrazec rušení
GLR	směšovací poměr plynu s olejem
HBV	Hydrogen Bubble Visualisation
k	bezrozměrné clonové číslo
kW	kilowatt
mm	milimetr
MPa	megapascal
ms	milisekunda
$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	metr za sekundu
PC	osobní počítač
PIV	Particle Image Velocimetry
RCP	ruční dálkové ovládání
s	sekunda
SHUTTER	čas závěrky
TV	televizní monitor
VR	vysokorychlostní kamera
W	Watt

11 Seznam příloh

1. Záznamy s konstantním FMR a proměnným SHUTTER
2. Záznamy s konstantním SHUTTER a proměnným FMR
3. Záznam č.6 upravený pro analýzu rychlostí